

FERNANDO MATOS SCOTTI

**EFEITOS GERAIS DA ALIMENTAÇÃO PULSADA DE ARAME NO
PROCESSO MIG/MAG COM TRANSFERÊNCIA METÁLICA
GLOBULAR**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2019

FERNANDO MATOS SCOTTI

**EFEITOS GERAIS DA ALIMENTAÇÃO PULSADA DE ARAME NO
PROCESSO MIG/MAG COM TRANSFERÊNCIA METÁLICA
GLOBULAR**

Trabalho de fim de curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia, como
requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel
em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Ruham Pablo Reis

UBERLÂNDIA - MG

2019

FERNANDO MATOS SCOTTI

**EFEITOS GERAIS DA ALIMENTAÇÃO PULSADA DE ARAME NO
PROCESSO MIG/MAG COM TRANSFERÊNCIA METÁLICA
GLOBULAR**

Trabalho de fim de curso **aprovado** pela
Faculdade de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. Ruham Pablo Reis

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ruham Pablo Reis – UFU - Orientador

Prof. Dr. Pedro Augusto Queiroz de Assis – UFU

Eng. Msc. Vinícius Lemes Jorge

Uberlândia, Julho de 2019

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este curso.

Ao Prof. Dr. Ruham Pablo Reis pelo incentivo e orientação na realização deste trabalho.

Ao Msc. Eng. Vinícius Lemes Jorge pelos ensinamentos e discussões.

Ao Prof. Dr. Américo Scotti por todos os ensinamentos e pelo exemplo como pesquisador.

Agradeço por fim, aos meus pais, minha irmã, minha namorada e meus amigos pelo apoio em todos os projetos aos quais me dedico.

SCOTTI, F. M. **Efeitos Gerais da Alimentação Pulsada de Arame no Processo MIG/MAG com Transferência Metálica Globular**. 2019. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

A alimentação pulsada de material é um dos campos de aprimoramento tanto no processo TIG como no MIG/MAG. Os equipamentos comercialmente disponíveis, de modo geral, dependem de tochas e/ou alimentadores específicos para a aplicação deste tipo de técnica. Além disso, a ampla compreensão dos fenômenos associados à alimentação pulsada ainda carece de caracterizações mais profundas. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo investigar os efeitos da alimentação pulsada de material no processo MIG/MAG com transferência metálica globular visando contribuir com o embasamento científico para a proposição de aplicações inovadoras da técnica. Foram realizados testes exploratórios para averiguar os efeitos da frequência e da amplitude de pulsação sobre os sinais elétricos no processo. A dinâmica das gotas na transferência metálica foi avaliada através de filmagens em alta velocidade com diferentes frequências de pulsação e fonte nos modos de corrente constante e tensão constante. As características geométricas dos cordões de solda foram medidas. Foi verificado que a pulsação mecânica afeta o desempenho do processo, os oscilogramas de tensão e corrente assumem frequências e amplitudes de oscilação diretamente relacionadas aos parâmetros de pulsação. Constatou-se que o emprego da pulsação promove, na maioria dos casos, o destacamento de gotas menores e com maior velocidade, quando comparados ao caso convencional. A frequência de pulsação de 16 Hz garantiu maior estabilidade e regularidade na transferência. A pulsação tende a reduzir a largura do cordão de solda, e concentrar a penetração no centro.

Palavras-chave: Soldagem. MIG/MAG. Transferência metálica globular. Pulsação da alimentação.

SCOTTI, F. M. **General Effects of Pulsed Wire Feeding on GMAW Process with Globular Metal Transfer**. 2019. 57 p. Undergraduate Final Project, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

ABSTRACT

The use of pulsed wire feeding has been a field of innovation on both GTAW and GMAW processes. The commercially available equipment, in general, require specific feeders and/or torches to implement such technique. Besides that, a wide comprehension of the phenomena involved in pulsed wire feeding still lacks deeper investigation. In this context, the present work aims to evaluate the effects of pulsed wire feeding on GMAW with globular metal transfer in order to contribute to the scientific background for further development of innovative applications of such technique. Exploratory tests were carried out to assess the effects of pulsing frequency and amplitude on the electric signals. Posteriorly, an analysis of the droplet dynamics on metallic transfer was made through high speed filming for a variety of wire feeding pulsing frequencies and power source on constant current and constant voltage operation modes. Moreover, the geometric characteristics of the weld beads were measured from the transverse sections. It was verified that the mechanical pulse affects the process, the voltage and current oscillograms assume frequencies and amplitudes directly related to the pulse parameters. It was found that, in most cases, pulsation promotes the detachment of smaller and faster droplets, when compared to the conventional case. The pulse frequency of 16 Hz resulted in a more stable and regular transfer. Besides that, it tends to reduce bead width and concentrates the penetration on its center.

Keywords: Welding. GMAW. Globular Metal Transfer. Pulsed Wire Feeding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Sistema típico para soldagem MIG/MAG (SCOTTI; PONOMAREV, 2014).....	5
Figura 2.2 - Fenômeno de autorregularem do arco no processo MIG/MAG	6
Figura 2.3 - Mapas esquemáticos e qualitativos dos campos de incidência dos modos principais de transferência metálica em MIG/MAG, em função da corrente e da tensão (à esquerda) e do comprimento de arco (à direita) (SCOTTI; PONOMAREV, 2014)	7
Figura 2.4 - Crescimento competitivo entre as forças da gravidade (F_g) e devido à tensão superficial (F_γ), caracterizando o diâmetro crítico em que a gota se destaca (SCOTTI; PONOMAREV, 2014)	8
Figura 2.5 - Esquemático da shadowgrafia aplicada à soldagem (BÁLSAMO, 2000 – adaptado)	9
Figura 2.6 - Geometria típica de um cordão de solda simples e as principais medidas geométricas (MIRANDA et al., 2015 - adaptado).....	9
Figura 2.7 - Regiões da secção transversal do cordão de solda (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992)	10
Figura 2.8 - Comparação entra alimentação pulsada com a técnica Dabber (a) e alimentação contínua (b) (RUDY, 1982 - adaptado).....	10
Figura 2.9 - Aparato de alimentação pulsada de arame com sistema biela-manivela para oscilação do conjunto tracionador (PLASCH, 2014 - adaptado)	11
Figura 2.10 - Alimentadores comerciais: (a) TIP TIG® ;(b) e tigSpeed®.....	12
Figura 2.11 - Princípio do processo CMT. V_d - Velocidade de alimentação; I_s - corrente de soldagem; U_s - tensão de soldagem (POSCH, 2013 - adaptado)	13
Figura 2.12 - Componentes da técnica CMT: alimentador (a), tocha com conjunto tracionador (b), "pulmão" (c) (FRONIUS - adaptado)	13
Figura 2.13 - Tocha MicroMIG™ (SKS, 2019 - adaptado)	14
Figura 2.14 - Comportamento da corrente de soldagem no tempo no processo MicroMIG™ (a) sequência de pulsos (b) curto-circuito com baixa corrente (c) recuo do arame com baixa corrente) (d) reignição do arco (SKS, 2019 -adaptado).....	15
Figura 2.15 - Esquema de funcionamento da técnica de pulsação da alimentação por pulmão ativo (SANTOS, 2016- adaptado)	16
Figura 2.18 - Sequência de funcionamento do dispositivo de pulsação acionado por motor linear e seus respectivos efeitos na ponta do arame (REIS et al., 2019)	17

Figura 2.19 - Diagramas teóricos de posição <i>versus</i> tempo da luva de condução do pulsador e da ponta do arame (a) com forma de onda triangular (b) com forma de onda quadrada.	18
Figura 3.1 - Bancada experimental utilizada nos testes exploratórios com detalhe do dispositivo de pulsação no alimentador convencional	20
Figura 3.3 - Oscilogramas de corrente e tensão monitorados para o Teste 1-A (0 a 11 s) e Teste 1-B (11 a 23 s)	22
Figura 3.4 - Oscilogramas de corrente e tensão monitorados para o Teste 1-B (à esquerda) e Teste 2 (à direita).....	23
Figura 3.5 - Aspectos geométricos dos cordões de solda resultantes dos testes conforme Tabela 3.2	24
Figura 4.1 - Bancada experimental para filmagem da transferência metálica com a técnica de shadowgrafia.....	27
Figura 4.2 – Exemplo de quatro sequências de quadros selecionadas para o teste 16 Hz com fonte UC	28
Figura 4.3 - Elipsoide de raios a,b e c (BYJU'S, 2019).....	29
Figura 4.4 - Exemplo do método de medição da geometria da gota	29
Figura 4.5 - Medição do deslocamento da gota em voo livre.....	30
Figura 4.6 - Curvas de Posição <i>versus</i> Tempo construídas para cada teste.....	30
Figura 4.7 - (a) Tempo médio de destacamento da gota em função do modo de operação e frequência de pulsação; (b) Frequência de destacamento em função do modo da fonte e frequência de pulsação.....	31
Figura 4.8 - Ciclo de avanço e retrocesso do arame eletrodo em que a gota não se destaca 26 Hz (Fonte UC)	32
Figura 4.9 - Destacamento irregular típico do caso com pulsação de 8 Hz e fonte CC	33
Figura 4.10 - Médias dos volumes e massas calculados para os testes em função da frequência de pulsação	33
Figura 4.11 - Modelo físico simplificado do destacamento da gota durante a transferência metálica globular convencional. m_g [kg] massa da gota; F_g – Força gravitacional; F_γ – Força devido à tensão superficial	34
Figura 4.12 - Modelo físico simplificado do destacamento da gota durante a transferência metálica globular por impulso devido à pulsação. a [m/s^2] – aceleração do arame; ΔS [m] - distância percorrida pela ponta do arame no avanço; m_g [kg] massa da gota; F_i – Força de impulso; F_g – Força gravitacional; F_γ - Força devido à tensão superficial.....	35

Figura 4.13 - Velocidade média das gotas a partir do destacamento até a chegada à poça de fusão	36
Figura 4.14 - Sequências de três quadros indicando as trajetórias de gotas destacadas durante o teste 8 Hz com fonte de corrente constante	37
Figura 4.15 - Sequências de três quadros indicando as trajetórias de gotas destacadas durante o teste 16 Hz com fonte de tensão constante	37
Figura 4.16 - Velocidades finais de voo das gotas para as frequências de pulsação 0, 8, 16 e 26 Hz	38
Figura 4.17 - Macrografias da seção transversal dos cordões de solda nas condições testadas	38
Figura 4.18 - Medidas de penetração dos cordões de solda para as frequências de 0, 8 e 16 Hz	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Parâmetros de soldagem utilizados nos testes de 1 a 5	21
Tabela 3.2 - Parâmetros de pulsação selecionados para os testes	21
Tabela 3.3 - Valores de corrente (I) e tensão (U) médias e eficazes monitorados para os testes da Tabela 3.2.....	24
Tabela 3.4 - Valores medidos de largura, penetração e altura do reforço dos cordões de solda resultantes dos testes da Tabela 3.2	25
Tabela 4.2 - Parâmetros selecionados para os testes com filmagem	28

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

TIG – Tungsten Inert Gas
MIG/MAG – Metal Inert Gas/Metal Active Gas
CMT – Cold Metal Transfer
CEF – Característica Estática da Fonte
CEA – Característica Estática do Arco
D% – Diluição
 A_{MB} – Área do Metal de Base
 A_{MA} – Área metal de adição
ZAC – Zona Afetada pelo Calor
CC – Corrente Constante
UC – Tensão Constante
 $U_{média}$ – Tensão Média
 $I_{média}$ – Corrente Média
 U_{rms} – Tensão Eficaz
 I_{rms} – Corrente Eficaz
 f_d – Frequência de destacamento de gotas
 T_d – Período de destacamento de gotas
 m_g – massa da gota
 V_g – volume da gota
 ρ – densidade do metal líquido
 v_{alim} – velocidade de alimentação
 d_a – diâmetro do arame
 v_m – velocidade média
 v_f – velocidade final
X – posição da gota
t – tempo
 F_g – Força gravitacional
 F_γ – Força devido a tensão superficial
 F_i – Força de impulso

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	3
1.1.1 Objetivos gerais.....	3
1.1.2 Objetivos específicos.....	3
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Características da soldagem MIG/MAG convencional.....	4
2.1.1 Autorregulação do comprimento do arco.....	5
2.2 Modos de transferência metálica.....	6
2.2.1 Transferência metálica globular	7
2.3 Filmagem com shadowgrafia	8
2.4 Características do cordão em soldagem por fusão	9
2.5 Alimentação pulsada de material em processos de soldagem a arco	10
2.5.1 Alimentação pulsada em soldagem TIG	10
2.5.2 Alimentação pulsada em soldagem MIG/MAG	12
2.6 Pulsação da alimentação de material pela técnica de “pulmão ativo”.....	15
2.6.1 Pulmão ativo de acionamento eletromecânico	Error! Bookmark not defined.
2.6.2 Pulmão ativo de acionamento por motor linear magnético	16
TESTES EXPLORATÓRIOS DE PULSAÇÃO DA ALIMENTAÇÃO NO PROCESSO MIG/MAG COM TRANSFERÊNCIA METÁLICA GLOBULAR	19
3.1 Metodologia	19
3.1.1 Materiais.....	19
3.1.2 Parâmetros selecionados	20
3.1.3 Tratamento dos sinais adquiridos e preparação das amostras	21
3.2 Resultados e Discussão	21
3.2.1 Sinais elétricos.....	21
3.2.2 Macrografias da secção transversal	24
ANÁLISE DA DINÂMICA DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA INDUZIDA POR IMPULSO MECÂNICO NA SOLDAGEM MIG/MAG	26
4.1 Metodologia	26
4.1.1 Materiais.....	26
4.1.2 Parâmetros selecionados	27
4.1.3 Medições e cálculos de Frequência de destacamento de gotas	28
4.1.4 Medições e cálculos de volume e massa das gotas.....	28
4.1.5 Medições e cálculos de velocidade das gotas em voo	29
4.2 Resultados e Discussão	31

4.2.1 Frequência de destacamento e regularidade das gotas	31
4.2.2 Volume e massa das gotas.....	33
4.2.3 Análise qualitativa das forças envolvidas no destacamento das gotas	34
4.3.4 Velocidade de voo das gotas	36
4.3.5 Aspectos geométricos dos cordões.....	38
CONCLUSÕES	40
REFÊRENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Os processos de soldagem a arco elétrico são empregados na fabricação e reparo de componentes nos mais diversos setores industriais. A união é feita através da fusão localizada do metal de base e a deposição de material pode ser feita tipicamente para preencher chanfros e/ou adequar a composição química do cordão de solda. A deposição de material também pode ser utilizada para operações de revestimento e de manufatura aditiva. A soldagem TIG (*Tungsten Arc Welding*) utiliza um eletrodo não consumível, de modo que pode ser feita de forma autógena ou com adição de material (manual ou automatizada). No processo MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*) utiliza-se um eletrodo consumível, na forma de arame, que é alimentado de forma automática por um sistema de motor elétrico e roletes tracionadores.

Visando melhorar desempenho, produtividade, qualidade e permitir a realização de operações específicas, os processos derivativos surgem como variantes dos processos tradicionais, propondo modificações e/ou adicionando componentes. A forma com que se faz a adição de material tem sido um dos campos de exploração em processos de soldagem. Tradicionalmente, a alimentação automatizada de material é feita de modo contínuo com velocidade constante. Uma derivação desse processo consiste na implementação de um dispositivo capaz de promover a alimentação pulsada, ou seja, realizar movimentos cíclicos de recuo e avanço do material de adição. Supõe-se que a ideia tenha surgido pela busca por emular a técnica já empregada manualmente por soldadores do processo TIG, na qual eles afastam e aproximam a vareta de forma consistente e ponderada durante a execução da solda. Em uma das descrições mais antigas de emprego de alimentação pulsada, Rudy (1982) apresenta a

técnica denominada *Dabber* TIG, na qual a adição de material era feita de forma intermitente e aplicada na reparação de turbinas aeronáuticas.

A indústria de equipamentos de soldagem apresenta alguns produtos comerciais que utilizam a alimentação pulsada. O *TIP TIG*[®] é baseado em um sistema de alimentação de arame que possui um conjunto de motor e mecanismo de quatro barras, sendo este último responsável por promover um efeito vibratório longitudinalmente no conjunto motor e roletes, resultando na pulsação linear do material de adição. Pike (2013), em um relatório de avaliação do *TIP TIG*[®], afirma que o equipamento é capaz de melhorar a dinâmica a poça de fusão, conferindo maior fluidez e reduzindo risco de inclusões e porosidade quando comparado ao processo TIG tradicional, além de aumentar a velocidade de soldagem e taxa de deposição. O *tigSpeed*[®], da empresa alemã EWM opera de forma semelhante ao *TIP TIG*[®]. O fabricante destaca que um melhor controle da poça de fusão é possível com o uso do equipamento, alcançando velocidades de soldagem mais altas, menor transferência de calor e maior conforto para o soldador (*TIP TIG*[®], 2019).

O processo *Cold Metal Transfer* (CMT) é uma tecnologia desenvolvida pelo fabricante austríaco Fronius, é uma variante do processo MIG/MAG. Utiliza-se uma tocha especial que permite realizar a reversão periódica do avanço do arame-eletrodo. Associado às linhas sinergias o processo realiza a transferência de material por curto-circuitos controlados. A tocha possui um pequeno sistema interno (motor e roletes) de tração variável. Esta reversão se dá sempre que o arame toca a poça de fusão, permitindo uma transferência suave da gota para a poça, associado também à redução drástica da corrente, evitando picos de corrente de curto-circuito e minimizando a ocorrência de respingos (perda de material). Como o arco fica sempre curto e o nível de corrente média é baixo, o calor imposto para a peça durante a soldagem é bem mais baixo que no processo MIG/MAG tradicional. Esta característica contribui para a qualidade e propriedades mecânicas da junta soldada.

As tecnologias de alimentação pulsada comercialmente disponíveis baseiam-se em mecanismos atrelados ao alimentador ou a tochas especiais. Para a implementação destes, torna-se necessária a substituição dos equipamentos convencionais por equipamentos específicos. Este fator representa em muitos casos uma limitação à aceitação desses processos na indústria. Jorge et. Al (2018) apresentaram dispositivos de pulsação da alimentação adaptável a alimentadores convencionais, uma vez que operam de forma externa e independente. Os autores mostram que no processo TIG a pulsação melhora a regularidade de transferência das gotas, além de promover um aumento na penetração. No processo MIG/MAG, também observam-se

vantagens em relação à maior regularidade e penetração com o uso da pulsação. Estes equipamentos foram construídos no Laboratório de Soldagem da Universidade Federal de Uberlândia. Neste contexto, abrem-se possibilidades de estudos a respeito da aplicação desta técnica em processos de soldagem.

Conforme descrito por Scotti e Ponomarev (2014), a transferência metálica globular ocorre quando os níveis de tensão são de moderado a altos e correntes baixas. As forças eletromagnéticas envolvidas são pequenas por conta do nível de corrente baixo. O destacamento é governado majoritariamente pela ação da força gravitacional (a favor do destacamento) e da força devido à tensão superficial (contrária ao destacamento). Devido ao crescimento e destacamento de gotas grandes as taxas de transferência são baixas e irregulares. Além disso, esse tipo de transferência não pode ser utilizado em soldagem fora de posição, fato que torna sua aplicação pouco desejada. Portanto, a ação de uma força adicional favorável ao destacamento, atribuída à ação mecânica da pulsação, abre possibilidades de desenvolvimento de novas técnicas dentro da soldagem MIG/MAG.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos gerais

O presente trabalho tem por objetivo avaliar os efeitos da pulsação da alimentação de arame sobre o desempenho da transferência metálica globular no processo MIG/MAG, utilizando o equipamento com acionamento eletromagnético desenvolvido por Jorge et. Al (2018).

1.1.2 Objetivos específicos

- Verificar o comportamento dos sinais elétricos durante o processo de soldagem frente às variações na amplitude e frequência de pulsação;
- Avaliar os efeitos da pulsação do arame sobre as características dinâmicas e regularidade da transferência metálica;
- Caracterizar as forças envolvidas no destacamento de gotas na transferência metálica com e sem pulsação da alimentação;
- Avaliar a influência da pulsação e seus parâmetros sobre a formação do cordão de solda.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados conceitos básicos, porém de suma importância para discutir fenômenos ocorrentes no processo de soldagem MIG/MAG. Serão apresentados alguns dos equipamentos comerciais patenteados mais utilizados para pulsar o arame de alimentação. Por fim, será descrito o equipamento para pulsar a alimentação de arame aplicado neste trabalho, assim como sua técnica baseada em um “Pulmão Ativo”.

2.1 Características da soldagem MIG/MAG convencional

Na soldagem MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*) ou GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) o arco elétrico é estabelecido entre a peça e um eletrodo consumível. O eletrodo, disposto na forma de arame e armazenado em uma bobina, é continuamente alimentado por um sistema de motor e roletes ao passo que é consumido pelo calor gerado no processo e depositado na junta. A região da solda é protegida por uma atmosfera de gás ativo ou inerte, podendo também ser feita com mistura de ambos. Normalmente, o arame é o polo positivo do circuito, configuração conhecida como polaridade inversa. A Figura 2.1 demonstra esquematicamente um sistema típico para soldagem MIG/MAG.

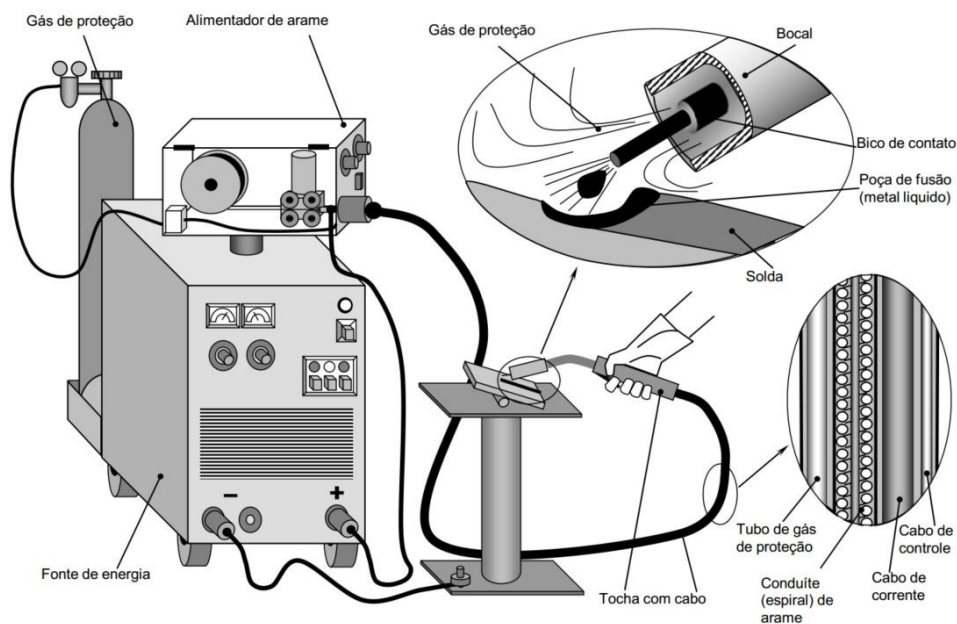


Figura 2.1 - Sistema típico para soldagem MIG/MAG (SCOTTI; PONOMAREV, 2014)

2.1.1 Autorregulação do comprimento do arco

O comportamento da tensão e da corrente elétrica em uma fonte de soldagem quando submetida a diferentes cargas é denominado Característica Estática da Fonte (CEF). De acordo com essa característica, as fontes podem ser definidas como fonte de tensão constante ou fonte de corrente constante. O arco elétrico pode ser caracterizado de acordo com a tensão requerida para uma dada condição de soldagem em função da corrente. Essa propriedade é denominada Característica Estática do Arco (CEA) e independe da fonte de soldagem (SCOTTI; PONOMAREV, 2014).

Nas fontes de corrente constante, a corrente é regulável e a curva da CEF tende a produzir uma corrente de trabalho relativamente constante ($\Delta U/\Delta I > 70 \text{ mV/A}$, na faixa normal de trabalho), de modo que a tensão não é regulável e será resultado da combinação da corrente com os demais parâmetros. Em uma fonte do tipo tensão constante, a tensão de trabalho é regulável e a curva de característica estática produz uma tensão relativamente constante ($\Delta U/\Delta I \leq 70 \text{ mV/A}$). A corrente de soldagem não é regulável e é dependente dos demais parâmetros do processo: velocidade de alimentação, comprimento livre do eletrodo, características dos materiais de adição e de base, diâmetro do arame eletrodo gás de proteção.

No processo MIG/MAG com fonte de tensão constante, para uma dada tensão, a corrente será diretamente proporcional à velocidade de alimentação. Para a compreensão do fenômeno da autorregulação do arco (também referenciado como controle pela velocidade de fusão ou controle interno), um exemplo é mostrado (Figura 2.2) em que uma tocha de soldagem

MIG/MAG se desloca linearmente sobre uma peça que possui um degrau. Com uma velocidade de alimentação devidamente regulada, o arco se estabelece e o ponto de intersecção entre as curvas de CEF e CEA, na região crescente da CEA, definindo o ponto de trabalho (Figura 2.2 a). Neste ponto o comprimento do arco (proporcional à tensão) é estabelecido e a velocidade de fusão do arame-eletrodo é igual à velocidade de alimentação. Quando a distância da tocha à peça aumenta, o arco tende a crescer e um ponto de trabalho transitório é estabelecido (Figura 2.2 b). A queda na tensão não é significativa e a corrente decresce, reduzindo a velocidade de fusão do arame-eletrodo (melhor falar em consumo). Uma vez que a velocidade de alimentação permanece constante e a velocidade de fusão é reduzida, a ponta do arame-eletrodo se aproxima progressivamente da peça, reduzindo o comprimento do arco. Ao passo que o arco diminui, a corrente passa a aumentar, de forma que ao fim do período transiente o comprimento a corrente são reestabelecidos a valores próximos aos iniciais (Figura 2.2 c). Observa-se que, como o comprimento livre do eletrodo é alterado, a corrente tem de ficar um pouco abaixo do valor inicial, devido ao maior efeito Joule. De forma análoga, se por algum motivo a distância entre tocha e peça for diminuída, ao invés de aumentada, o mesmo fenômeno seria responsável pelo reestabelecimento do comprimento do arco.

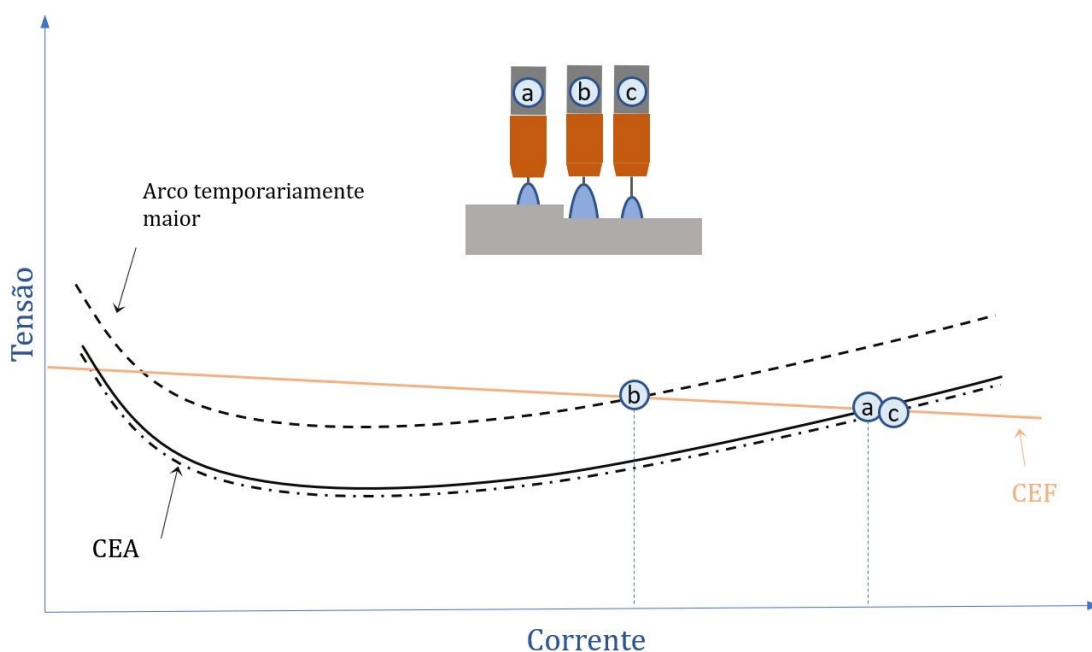


Figura 2.2 - Fenômeno de autorregularem do arco no processo MIG/MAG

2.2 Modos de transferência metálica

Em função dos parâmetros utilizados, a forma com que o material de adição se transfere para a peça assume um comportamento característico. As gotas de metal formadas no arame

eletrodo podem assumir diferentes tempos de crescimento, dimensões e frequências de destacamento. Dentre os fatores que influenciam o modo de transferência metálica, destacam-se: material e diâmetro do eletrodo; gás de proteção; intensidade e polaridade da corrente de soldagem; comprimento do arco e pressão ambiente (SCOTTI; PONOMAREV, 2014).

Conforme classificado por Scotti e Ponomarev (2014), na soldagem MIG/MAG distinguem-se três classes de modos de transferência metálica: naturais, controlados e intercambiáveis. A transferência de classe natural é dividida em dois grupos: transferência por contato e transferência por voo livre. Na transferência por contato, ocorre o contato da gota com a poça de fusão antes que ela tenha se destacado do arame eletrodo. Na transferência por voo livre, a gota se destaca antes do contato com a poça de fusão. A transferência por voo livre pode ainda ser subdividida em globular (gotas maiores que o diâmetro do eletrodo) e goticular (gotas menores que o diâmetro do eletrodo). A Figura 2.3 mostra mapas esquemáticos dos campos de incidência dos principais modos de transferência metálica em MIG/MAG.

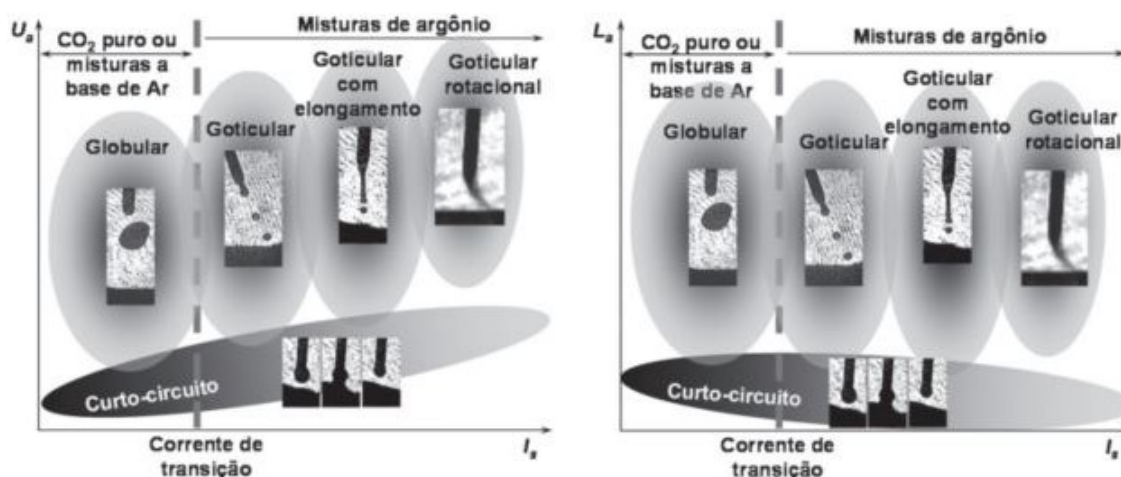


Figura 2.3 - Mapas esquemáticos e qualitativos dos campos de incidência dos modos principais de transferência metálica em MIG/MAG, em função da corrente e da tensão (à esquerda) e do comprimento de arco (à direita) (SCOTTI; PONOMAREV, 2014)

2.2.1 Transferência metálica globular

A transferência globular ocorre com níveis de tensão de moderados a altos (o que implica maior comprimento de arco) dificulta a ocorrência de curto-circuito. Em correntes baixas, as forças eletromagnéticas não são tão significativas. Deste modo, esse tipo de transferência é caracterizado pela transferência irregular de gotas grandes (maiores que o diâmetro do eletrodo) em frequência baixa (1 a 10 Hz) (SCOTTI; PONOMAREV, 2014).

De modo geral, as forças que agem sobre as gotas na transferência metálica são: força gravitacional, força eletromagnética, força devido à tensão superficial do metal fundido; força

de arraste dos gases; e força de vaporização. No entanto, no modo globular são consideradas mais significativas as forças devido à tensão superficial e ao peso. À medida que a gota cresce, a força de tensão superficial cresce em função do perímetro e da energia livre de superfície (simbolizado por γ) e é contrária ao destacamento da gota. Por outro lado, a força peso atuante sobre a gota cresce conforme aumenta a massa da gota e atua a favor do destacamento. A tensão superficial cresce em proporção direta com o diâmetro da gota, já a força peso aumenta em proporção cubica com o diâmetro (Figura 2.4). Em decorrência dessa diferença quando a gota atinge um diâmetro crítico, onde a força peso supera a de tensão superficial, ocorre o destacamento. (SCOTTI; PONOMAREV, 2014).

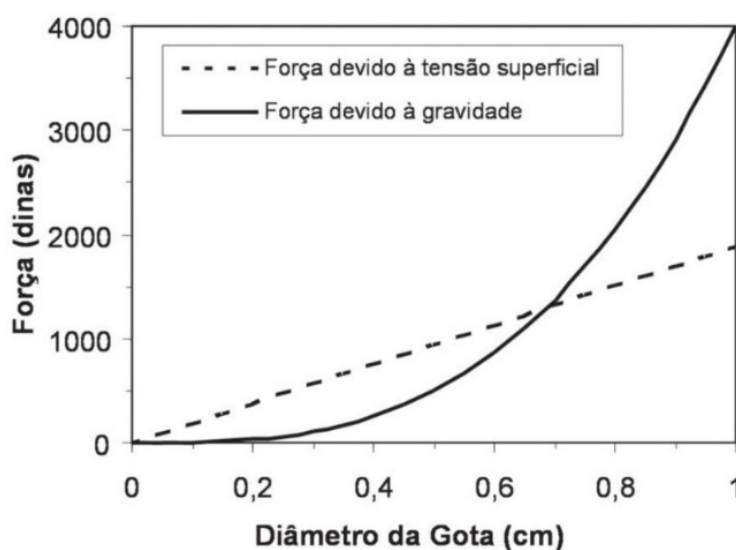


Figura 2.4 - Crescimento competitivo entre as forças da gravidade (F_g) e devido à tensão superficial (F_γ), caracterizando o diâmetro crítico em que a gota se destaca (SCOTTI; PONOMAREV, 2014)

2.3 Filmagem com shadowgrafia

A shadowgrafia refere-se à sombra projetada dos elementos na região de soldagem (bocal, eletrodo, gotas, peça) em uma superfície plana (Bálsamo, 2000). Esta técnica é aplicada na filmagem de processos de soldagem a arco, pois permite a visualização dos modos de transferência metálica. O desenho esquemático da técnica é mostrado na Figura 2.5. Como a luz do arco elétrico é muito intensa e irradia em todas as direções, torna-se necessária a utilização de uma fonte adicional de luz. Normalmente, emprega-se um laser de Hélio-Neon, cujo comprimento de onda corresponde a 632,8 nm, que corresponde a uma região mais fraca do espectro do arco. Com a utilização de um filtro ótico que restringe a passagem de luz somente de comprimentos de onda próximos ao do laser, é possível bloquear quase totalmente a luz do arco. A imagem resultante, portanto, consiste da sombra projetada os elementos de soldagem e o fundo vermelho.

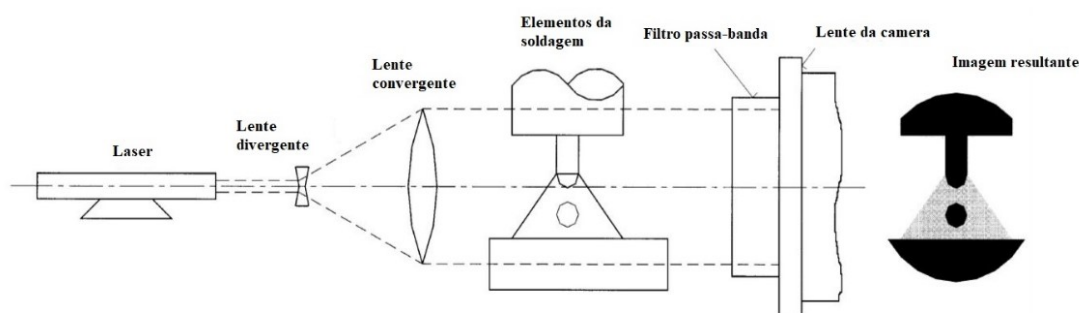


Figura 2.5 - Esquemático da shadowgrafia aplicada à soldagem (BÁLSAMO, 2000 – adaptado)

2.4 Características do cordão em soldagem por fusão

Um dos métodos de análise em processos de soldagem por fusão é através de medições nas grandezas geométricas na seção transversal do cordão de solda (Figura 2.6). Onde L corresponde à largura, R – reforço, P – penetração, A_{MB} – área do metal de base e A_{MA} – área do metal de adição. Para que se possa revelar essas estruturas é necessário que as amostras soldadas sejam cortadas, lixadas e atacadas quimicamente. Registradas as imagens das secções transversais, é possível medir as grandezas através de um *software* de processamento de imagem.

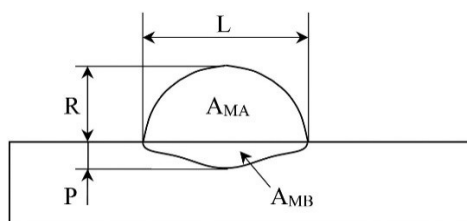


Figura 2.6 - Geometria típica de um cordão de solda simples e as principais medidas geométricas (MIRANDA et al., 2015 - adaptado)

A zona fundida é equivalente à soma das áreas de metal de base e área de metal de adição. A diluição é definida como a parcela do material de base que entra na composição da zona fundida e é calculada conforme a equação abaixo:

$$D\% = 100 \cdot \frac{A_{MB}}{A_{MB} + A_{MA}} \quad (2.1)$$

Devido ao aquecimento elevado para fundir os materiais de adição e base, a região adjacente à zona fundida é submetida a um ciclo térmico de aquecimento e resfriamento rápido capaz de provocar transformações metalúrgicas localizadas. Essa região é denominada Zona Afetada pelo Calor (ZAC) ou Zona Termicamente Afetada (ZTA). A região onde não ocorrem transformações provocadas pelo processo de soldagem é descrita como metal de base. A Figura 2.7 ilustra as três regiões mencionadas.

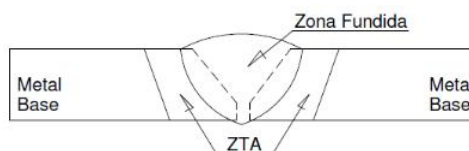


Figura 2.7 - Regiões da seção transversal do cordão de solda (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992)

2.5 Alimentação pulsada de material em processos de soldagem a arco

2.5.1 Alimentação pulsada em soldagem TIG

A técnica denominada *Dabber TIG* descrita por Rudy (1982) baseia-se na alimentação intermitente de arame para a poça de fusão em função da corrente de soldagem. Os ciclos de entrada e saída do arame na poça ocorre em frequências entre 3 e 11 Hz com amplitudes de movimento do arame de 5 a 6 mm. O autor compara alimentação pulsada (técnica *dab*) e a alimentação contínua como mostrado na Figura 2.8. Quando o *Dabber* é utilizado (Figura 2.8 a) o arame se aproxima da poça mais rapidamente do que o arame alimentado continuamente. A aproximação mais lenta faz com que o arame fique sujeito a um maior preaquecimento e se funda prematuramente, formando nódulos de metal semilíquido de comportamento imprevisível (Figura 2.8 b). A formação desses nódulos pode ser contornada no processo convencional de duas formas: utilizando diâmetros menores de arame ou utilizando ângulos menores de entrada do arame. O autor argumenta que quando o método *Dabber* é utilizado as restrições de diâmetro e ângulo de entrada do arame são reduzidas, o que pode ser vantajoso para procedimentos em partes de difícil acesso. Além disso, observou-se através de filmagens de alta velocidade que a poça de fusão apresenta melhor equilíbrio térmico e fluidez quando comparado à alimentação contínua.

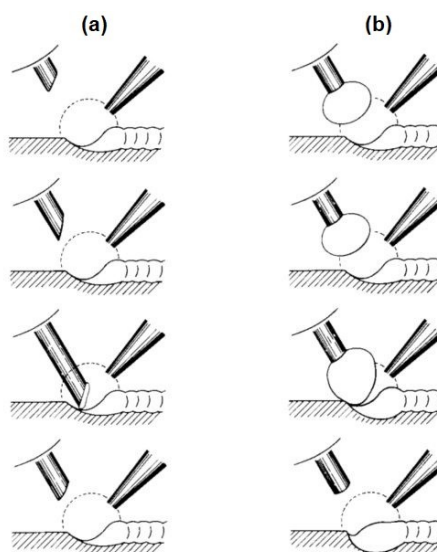


Figura 2.8 - Comparação entre alimentação pulsada com a técnica *Dabber* (a) e alimentação contínua (b) (RUDY, 1982 - adaptado)

A realização do movimento oscilatório no *Dabber TIG* é feita através de um alimentador com acionamento periódico do motor de acionamento dos roletes tracionadores em comunicação com os sinais da fonte de soldagem. Isso implica que a implementação do Dabber TIG requer a substituição completa do conjunto fonte e alimentador.

Entre os mais populares equipamentos de alimentação pulsada para soldagem TIG destaca-se o TIP TIG®. O movimento de alimentação contínua de arame é sobreposto por um movimento secundário de oscilação rápida do conjunto tracionador. Este conjunto é montado sobre uma guia linear horizontal e é movimentado alternadamente por um sistema mecânico do tipo biela-manivela. Deste modo, a sobreposição dos movimentos de alimentação, através da rotação dos roletes, com a vibração do conjunto tracionador proporciona movimentos cíclicos de avanço e retorno da ponta do arame. A patente US20160059342A1 descreve o funcionamento desse mecanismo, a invenção é mostrada na Figura 2.9.

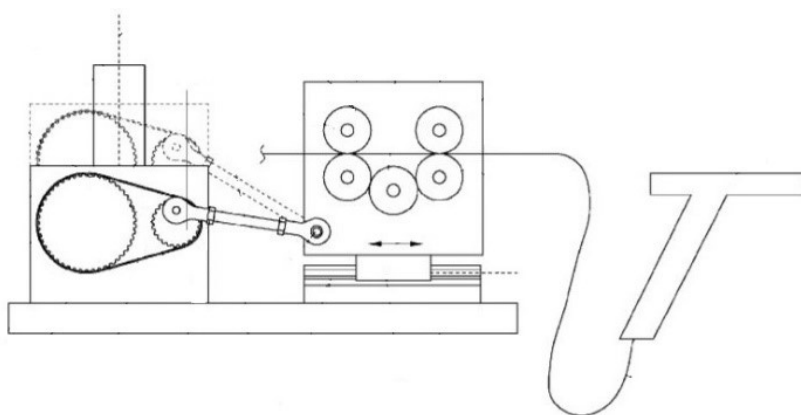


Figura 2.9 - Aparato de alimentação pulsada de arame com sistema biela-manivela para oscilação do conjunto tracionador (PLASCH, 2014 - adaptado)

O TIP TIG® conta também com um sistema de preaquecimento do arame. Através do *website* da fabricante são apresentadas diversas vantagens do equipamento sobre os alimentadores convencionais e outros processos de soldagem entre elas: boa produtividade, maior facilidade de operação por soldadores, menor potencial de ocorrência de falta de fusão e porosidade. Pike (2013), constatou em relatório que em relação ao processo TIG manual, o TIP TIG® apresenta vantagens em termos de menor distorção, menor calor imposto, melhor fluidez e limpidez da poça de fusão. No entanto, o TIP TIG® apresentou desvantagens em relação ao processo manual em termos de acessibilidade em juntas profundas e estreitas e operações em espaços confinados. O autor não observou alterações na qualidade do metal de solda e nas propriedades mecânicas. A fabricante alemã EWM, comercializa o alimentador *tigSpeed*® que possui funcionamento similar ao TIP TIG. A pulsação é obtida pelo movimento oscilatório do conjunto tracionador e são disponibilizadas versões com e sem preaquecimento. As vantagens

alegadas pelo fabricante são: maiores velocidades de soldagem, maior taxa de deposição, menor diluição, maior controle da poça de fusão, entre outras. Apesar da tendência e lançamento de diversas opções comerciais, a literatura a respeito do tema ainda é escassa e a compreensão dos fenômenos envolvidos no processo de alimentação pulsada ainda carecem de investigações mais profundas.



Figura 2.10 - Alimentadores comerciais: (a) TIP TIG® ;(b) e tigSpeed®

Silwal e Santangelo (2018) avaliaram o uso da vibração e do preaquecimento de arame no processo TIG. Os autores constataram maior frequência de destacamento de gotas e maior taxa de deposição sem modificações significativas na geometria dos cordões. Silva et al. (2018) observaram vantagens na aplicação de oscilações de baixa frequência na alimentação de material, os autores descrevem a técnica como alimentação dinâmica. A oscilação garantiu que o arame entrasse ainda sólido na poça de forma que o material se transfere sem a formação prévia de gotas. Silva et al. (2018) obtiveram bons resultados em soldagem TIG orbital com o emprego da oscilação do arame, atingindo velocidades de soldagem superiores às descritas por outros autores que avaliaram o processo convencional.

2.5.2 Alimentação pulsada em soldagem MIG/MAG

Na soldagem MIG/MAG a técnica de transferência metálica por curto-circuito controlado, apresentada comercialmente como *Cold Metal Transfer* (CMT) pela fabricante Fronius, destaca-se pelo grau de controle do processo de deposição de material. Além disso, a técnica proporciona a redução do calor imposto durante a soldagem. Na CMT o arame é alimentado continuamente por um conjunto tracionador primário (Figura 2.12 a) e um arco elétrico (protegido por uma atmosfera de gás ativo ou inerte) é estabelecido entre a ponta arame eletrodo e a peça, como no processo MIG/MAG convencional. A diferença se dá no uso de uma tocha especial que, através de um conjunto de tração secundário (motor e roletes, Figura 2.12 b), efetua a reversão periódica do movimento de avanço do arame. A reversão do movimento do arame se dá quando o mesmo toca a poça de fusão, aliado a uma queda drástica na corrente programada pela fonte, garantindo uma transferência de material suave e sem respingos (perda

de material). A Figura 2.11 mostra a sequência de passos do processo CMT, o menor calor imposto é atribuído ao fato de que o arco elétrico fica sempre curto e o nível de corrente média é relativamente baixo. Como forma de compensar/acomodar o aumento e restabelecimento da trajetória percorrida pelo arame, que ocorre devido aos movimentos de recuo e ao avanço do arame, é instalado um *buffer* (Figura 2.12 c) entre o alimentador e a tocha, que pode ser descrito em português como um “pulmão”. Caso os limites de diferença entre as velocidades dos conjuntos tracionadores seja excedido, um sensor instalado no “pulmão” envia um sinal ao alimentador para que a velocidade de alimentação seja ajustada. Atualmente já foram lançadas versões derivadas do CMT como *CMT Advanced*, *CMT Pulse*, *CMT Twin*, entre outros.

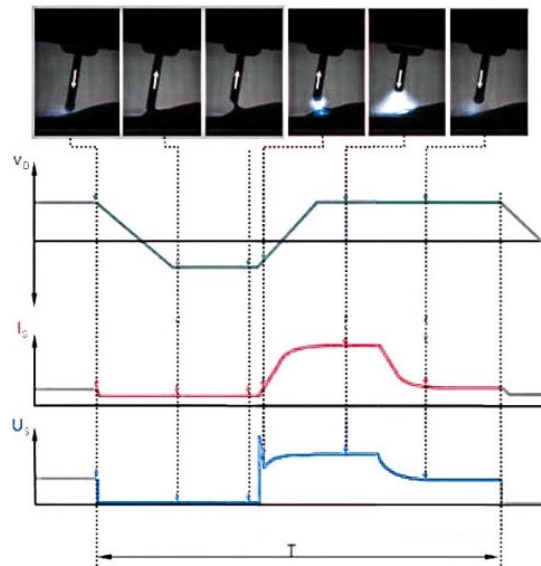


Figura 2.11 - Princípio do processo CMT. V_d - Velocidade de alimentação; I_s - corrente de soldagem; U_s - tensão de soldagem (POSCH, 2013 - adaptado)

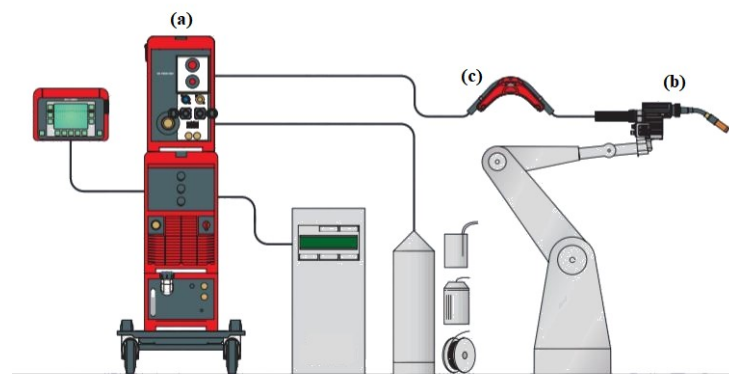


Figura 2.12 - Componentes da técnica CMT: alimentador (a), tocha com conjunto tracionador (b), “pulmão” (c) (FRONIUS - adaptado)

Dutra, Silva e Marques (2014) verificaram que o CMT representa uma boa solução tecnológica, e atribuíram a qualidade do processo à elevada estabilidade (em termos de arco e poça de fusão) e cadência quase perfeita entre fases de grande potência e baixa potência. O uso

da CMT é apontado como solução em diversas operações de elevada dificuldade e exigência como juntas dissimilares, manufatura aditiva e revestimentos. Por exemplo Zhang, Feng e He (2008) fizeram uniões de aço galvanizado com alumínio e observaram que, devido ao menor calor imposto, a espessura da camada intermetálica frágil composta é reduzida. Almeida e Williams (2010) concluíram que o uso a CMT proporciona um processo estável e sem geração de respingos com boa reprodutibilidade quando aplicado à manufatura aditiva da liga de titânio Ti-6Al-4V.

A SKS *Welding System Company* apresentou em 2009 o processo MicroMIG™. De forma semelhante à CMT, o MicroMIG™ utiliza uma tocha especial (Figura 2.13) equipada de um conjunto de motor e roletes capazes de inverter o sentido de movimento do arame e opera de acordo com um preciso controle da corrente. No entanto, diferente da CMT, o MicroMIG™ não possui um segundo conjunto tracionador, o que elimina problemas de sincronia das velocidades dos motores e dispensa o uso do “pulmão”.



Figura 2.13 - Tocha MicroMIG™ (SKS, 2019 - adaptado)

O fabricante argumenta que com o MicroMIG™ é possível atingir taxas de deposição elevadas com baixas frequências de inversão de movimento do motor, isso é feito intercalando gotas destacadas por pulsos na corrente com curto-circuitos controlados. A Figura 2.14 mostra com o processo funciona de acordo com o comportamento da corrente elétrica no tempo. A sequência de pulsos (Figura 2.14 a) é utilizada para criar a poça de fusão e indiretamente estabelecer a velocidade de alimentação, nessa etapa uma gota é destacada a cada pulso de corrente exceto o último, no qual a gota é apenas formada. Na sequência, o arame avança até que a gota formada entre em contato com a peça com baixa corrente (Figura 2.14 b). O sentido de movimento do alimentador é invertido por um tempo definido, com corrente ainda mais baixa (figura 2.14 c). Ocorre a reignição do arco e após um curto período (Figura 2.14 d) o ciclo se inicia novamente.

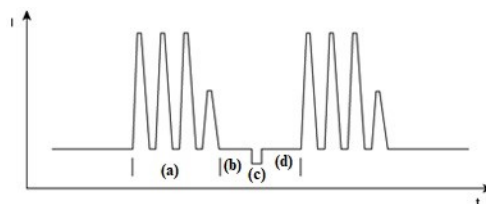


Figura 2.14 - Comportamento da corrente de soldagem no tempo no processo MicroMIG™ (a) sequência de pulsos (b) curto-circuito com baixa corrente (c) recuo do arame com baixa corrente (d) reignição do arco (SKS, 2019 -adaptado)

2.6 Pulsação da alimentação de material pela técnica de “pulmão ativo”

Verifica-se através dos diversos processos apresentados no subcapítulo 2.4 que a pulsação da alimentação de material é um tema pertinente ao desenvolvimento de processos derivativos em soldagem. No entanto, chama-se a atenção para o fato de que todos eles têm a pulsação da alimentação atrelada a alimentadores e/ou tochas especiais. Isto implica que a implementação dos mesmos exige a substituição de equipamentos convencionais por estes mais específicos, fator que representa uma barreira à aceitação destas novas técnicas na indústria. Neste contexto, conforme apresentado nos trabalhos de Santos (2016) e Jorge et Al (2018), justifica-se o desenvolvimento de uma técnica de pulsação por meio de um dispositivo externo ao cabeçote alimentador e que não dependa de uma tocha especial, de forma que seja possível adaptá-lo aos alimentadores e tochas convencionais.

A técnica proposta baseia-se na variação cíclica de parte do comprimento do percurso do arame de adição através da flexão transversal do conduíte. Essa variação da trajetória resulta em movimentos de avanço e retrocesso na ponta do arame. No aparato da CMT o *buffer* funciona como um pulmão passivo, ou seja, ele acomoda as variações na trajetória do arame, mas não atua diretamente sobre o movimento de avanço e retrocesso. Neste caso, a técnica é denominada pulmão ativo, pois o equipamento atua diretamente sobre o conduíte, alterando a trajetória do arame.

No esquema apresentado na Figura 2.15 é mostrado o funcionamento do mecanismo para permitir a pulsação da alimentação de arame externamente ao cabeçote da fonte. O arame corre por dentro de um conduíte, sendo impulsionado a uma velocidade constante pelo alimentador de arame, como ilustra o quadro (1) da Figura 1. Como esta velocidade de alimentação é igual, em média, à taxa de fusão do arame (assumindo haver um arco com energia suficiente para igualar a taxa de alimentação com a taxa de fusão do arame), a ponta do arame assume uma distância fixa em relação ao guia na saída. No quadro 2, um movimento transversal é aplicado em um ponto do conduíte, de tal forma que, ao flexioná-lo, o arame que vem sendo alimentado a uma velocidade constante sofre retração, pois é puxado para trás junto com o

conduíte. Assim, o recuo do arame (R) é obtido pela razão geométrica da amplitude de flexão alternada (H) e do comprimento livre do conduíte (L) que fica sob ação da flexão transversal. Com o retorno do conduíte para a posição de referência (quadro (3)), a ponta do arame volta à posição original, uma vez que a taxa de fusão do arame continua igual à sua velocidade de alimentação. Como o arame fica livre para deslizar dentro do conduíte, fisicamente o que ocorre é um aumento momentâneo do comprimento da trajetória que o arame tem de percorrer. Se a velocidade de alimentação provida pelo alimentador é fixa, tem-se neste momento menos arame saindo do pulsador, ou seja, chegando na posição do arco/poça.

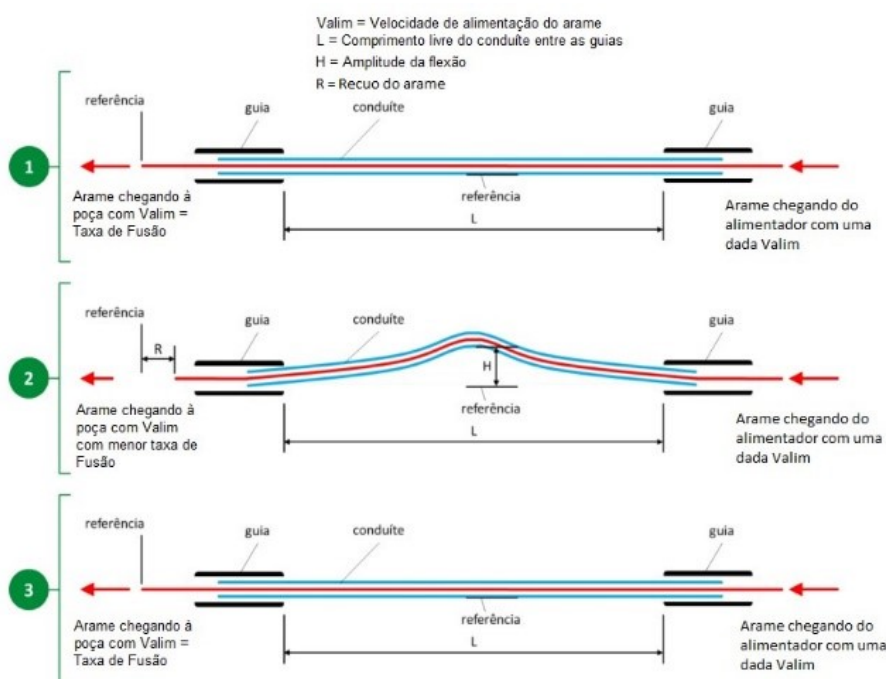


Figura 2.15 - Esquema de funcionamento da técnica de pulsação da alimentação por pulmão ativo (SANTOS, 2016- adaptado)

2.6.1 Pulmão ativo de acionamento por motor linear magnético

Neste dispositivo a flexão do conduíte é feita através do acionamento por um motor linear que se desloca na direção transversal ao conduíte. Um motor linear é um tipo de motor elétrico assíncrono que, ao invés de gerar um movimento de rotação, gera um deslocamento linear. O uso desse tipo de motor confere ao equipamento uma maior precisão e versatilidade nas configurações de amplitude e frequência do movimento. Através do *software* de controle é possível especificar velocidade, aceleração e deslocamento do motor. A Figura 2.18 mostra as diferentes posições assumidas pelo dispositivo e as respectivas consequências na ponta do arame eletrodo.

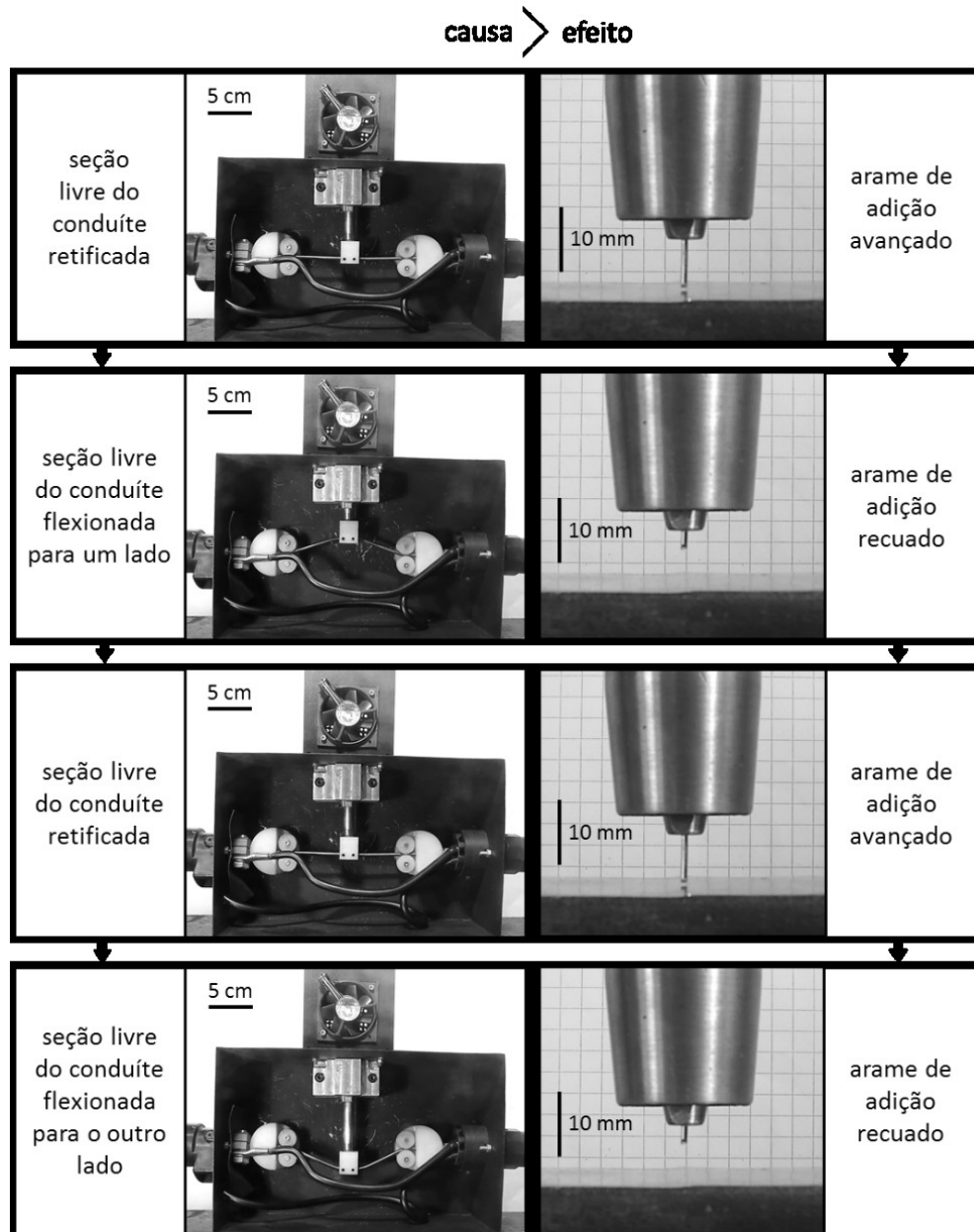


Figura 2.16 - Sequência de funcionamento do dispositivo de pulsação acionado por motor linear e seus respectivos efeitos na ponta do arame (REIS et al., 2019)

Neste sistema, torna-se possível a regulação mais precisa de tempos de parada nos pontos de flexão máxima do conduíte, que correspondem aos pontos de recuo da ponta do arame. A Figura 2.19 mostra o comportamento teórico da posição da ponta do arame em relação à luva de condução em duas situações, desconsiderando a velocidade de alimentação. Em (a) o motor movimenta-se ciclicamente entre os pontos de avanço máximo e recuo máximo sem tempos de parada programados, deste modo que o gráfico assume a forma triangular. Em (b) o motor tem tempos de parada programados nos pontos de avanço máximo e recuo máximo, resultando em um gráfico de forma quadrada. Chama-se atenção para o fato de que na ponta do arame, esses tempos de parada ocorrem somente na posição de recuo máximo. Nesta condição,

o arame avança e recua rapidamente, e permanece parado durante o tempo programado na posição de recuo.

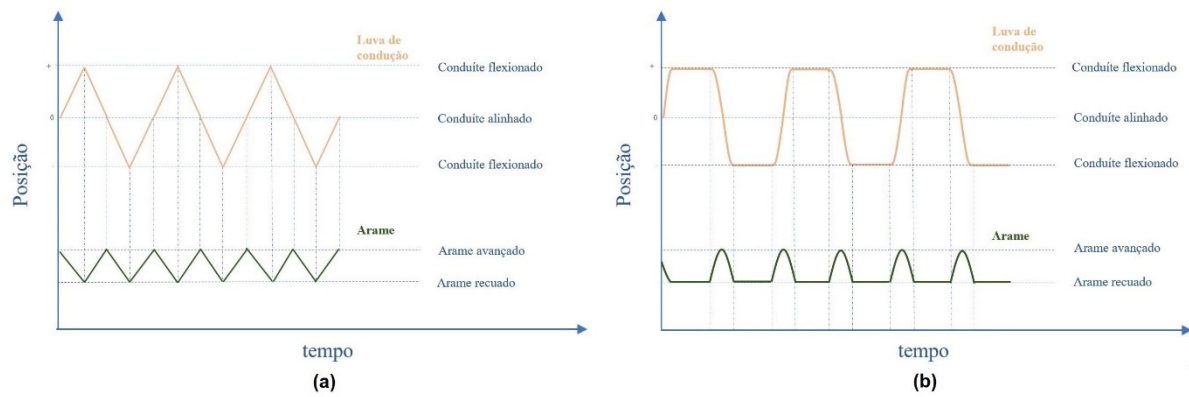


Figura 2.17 - Diagramas teóricos de posição *versus* tempo da luva de condução do pulsador e da ponta do arame (a) com forma de onda triangular (b) com forma de onda quadrada.

CAPÍTULO III

PULSAÇÃO DA ALIMENTAÇÃO NO PROCESSO MIG/MAG COM TRANSFERÊNCIA METÁLICA GLOBULAR: TESTES EXPLORATÓRIOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos utilizados para explorar a pulsação da alimentação no transferência metálica globular. Foram testadas diferentes amplitudes e frequências de pulsação em soldagens de simples deposição. Por fim, serão discutidos os resultados dos oscilogramas de corrente e tensão e a geometria dos cordões na seção transversal.

3.1 Metodologia

3.1.1 Materiais

O equipamento para pulsar a alimentação de arame, de acionamento por motor linear, possui uma conexão do tipo EuroConector, permitindo seu acoplamento em um alimentador convencional MIG/MAG modelo IMC STA-20, conforme a Figura 3.1. Foi necessário construir uma base para sustentação do pulsador uma vez que o acoplamento entre o equipamento e o cabeçote não suporta o peso do pulsador somado ao da tocha.

Foram realizadas soldagens de simples deposição sobre placas de teste de aço inoxidável, confeccionadas a partir de barras chatas com dimensões de 160 x 28 x 6 mm. Foi utilizado um arame maciço da classe AWS ER70S-6, com diâmetro 1,0 mm e o gás de proteção

foi Argônio-25%CO₂ com vazão regulada em 14 L/min. A soldagem foi realizada com o uso de uma fonte eletrônica de soldagem comercial, operando no modo tensão constante. Os sinais de tensão e corrente foram adquiridos por um sistema A/D a uma frequência de 5 kHz. O movimento da tocha foi realizado por um robô de 6 eixos. A Figura 3.2 ilustra a bancada experimental montada para realização dos experimentos.

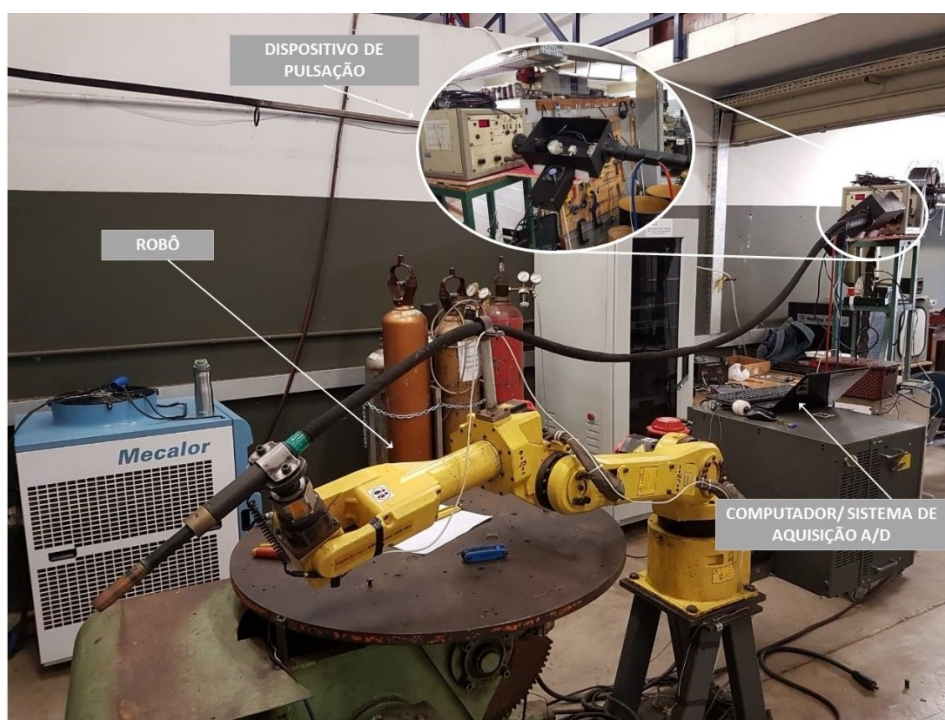


Figura 3.1 - Bancada experimental utilizada nos testes exploratórios com detalhe do dispositivo de pulsação no alimentador convencional

3.1.2 Parâmetros selecionados

Os parâmetros de soldagem foram selecionados de modo que fosse obtida a transferência metálica do tipo globular conforme descritos na Tabela 3.1. Foram selecionadas cinco combinações de frequência e amplitude de pulsação a serem programados no dispositivo. A Tabela 3.2 descreve os parâmetros de pulsação de cada teste. Os parâmetros de soldagem foram mantidos para todos os testes. Observa-se que o teste 1 foi feito habilitando-se a pulsação a partir da metade do cordão. A primeira metade (Teste 1-A) corresponde ao teste de referência sem pulsação enquanto a segunda metade (Teste 1-B) corresponde ao teste com pulsação de amplitude 6 mm e frequência 16 Hz. A pulsação da alimentação foi programada de modo que os avanços e recuos do pulsador são feitos com a mesma aceleração em todos os testes, a frequência é variada de acordo com o tempo de parada do motor nas posições de flexão máxima do conduíte, que correspondem à posição de recuo máximo do arame, conforme a Figura 2.20.

Tabela 3.1 - Parâmetros de soldagem utilizados nos testes de 1 a 5

Parâmetro	Valor
Velocidade de Soldagem (cm/min)	20
DBPC (mm)	19
Tensão (V)	34
Velocidade de Alimentação (m/min)	4,8

Tabela 3.2 - Parâmetros de pulsação selecionados para os testes

Testes	Amplitude de pulsação (mm)	Frequência de pulsação (Hz)
1-A*	0	0
1-B*	6	16
2	4	16
3	2	16
4	4	26
5	4	20

3.1.3 Tratamento dos sinais adquiridos e preparação das amostras

Os arquivos contendo os sinais de elétricos monitorados durante os testes são exportados na forma de arquivo de texto pela plataforma LabVIEW®. Estes dados foram tratados utilizando o *software* OriginPro® sendo possível a geração dos gráficos de tensão e corrente no tempo, além dos cálculos dos valores médio e eficaz de cada um deles.

Foram realizados cortes na seção transversal de cada uma das placas de testes. As superfícies foram lixadas em ordem crescente de granulometria das lixas (*mesh* 80, 120, 320 e 400) e submetidas ao ataque químico com Nital 10% (solução de ácido nítrico em álcool). As imagens de cada seção transversal foram registradas com um microscópio Olympus SZ61. Através das imagens as grandezas geométricas do cordão foram medidas através do *software* ImageJ®.

3.2 Resultados e Discussão

3.2.1 Sinais elétricos

A Figura 3.3 mostra os oscilogramas de corrente e tensão dos Testes 1-A e 1-B. Nota-se no intervalo correspondente ao Teste 1-A (de 0 a 11 s) a oscilação transiente dos sinais de forma caótica quando a pulsação da velocidade de arame não é aplicada. Chama-se atenção

para o fato de que, ao se trabalhar com a fonte tensão constante, o processo tenta corrigir automaticamente o comprimento do arco. No caso de transferência globular, mesmo sem a pulsação da alimentação do arame, há variação do comprimento do arco. Este se torna mais curto à medida que a gota cresce (o arco fica acoplado sob a gota em formação), assumindo o valor máximo repentinamente ao destacar a gota. Este fenômeno é caracterizado pelos valores dinâmicos do sinal de corrente (a corrente cresce para arcos mais curtos e decresce para arcos mais longos), que é livre quando se usa a fonte no modo tensão constante (a variação de amplitude da tensão observada no oscilograma quando a oscilação da velocidade de alimentação não é habilitada reflete principalmente ruídos dos sinais de alta frequência).

Já quando se habilitou a pulsação da velocidade de alimentação do arame, a partir do intervalo de 11 a 23 segundos, correspondente ao teste 1-B, da Figura 3.3, os oscilogramas passam a ser regulares, acompanhando o movimento dinâmico da pulsação. Quando o arame é puxado, a fonte também tenta corrigir automaticamente a altura do arco, que neste caso ficou maior. Assim o efeito ativo da corrente atua, diminuindo-a. Quando o arame é empurrado, o arco diminui (reduzindo a tensão) e a corrente aumenta. Percebe-se que o pico da corrente está sempre sincronizado com o vale da tensão, assim como os menores valores de corrente estão sempre sincronizados com os picos de tensão. Estes efeitos são reproduzidos ciclicamente na mesma frequência da pulsação da alimentação.

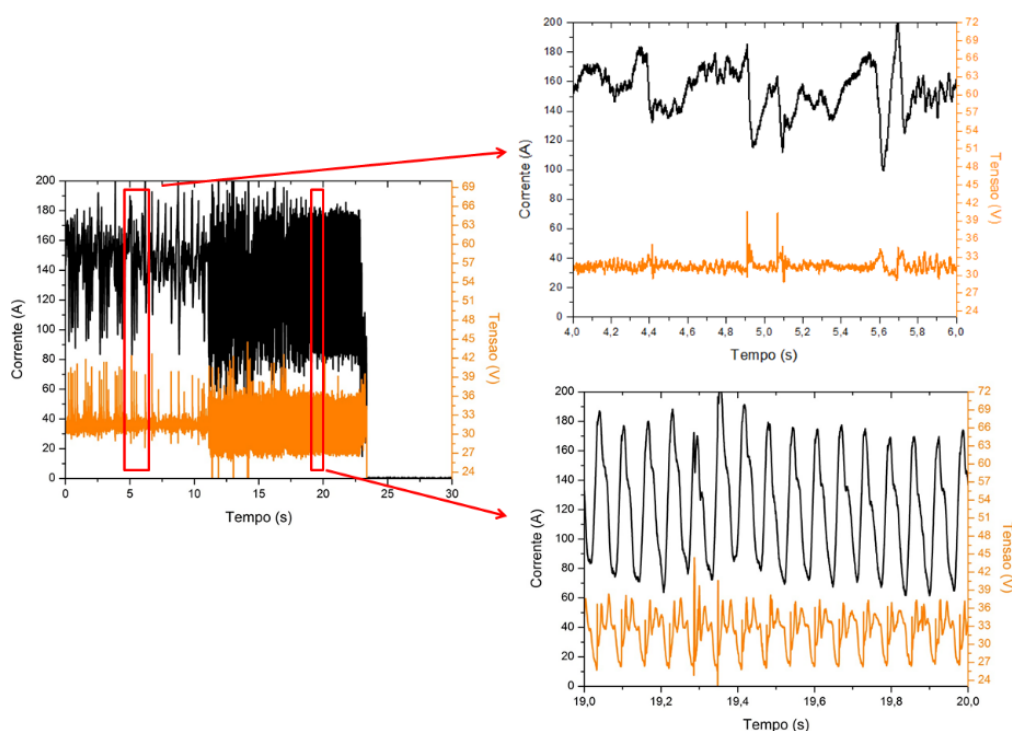


Figura 3.2 - Oscilogramas de corrente e tensão monitorados para o Teste 1-A (0 a 11 s) e Teste 1-B (11 a 23 s)

A comparação entre os testes 1-A e 1-B permitem confirmar que a pulsação da alimentação possui efeito sobre a transferência metálica nessas condições. Os demais testes indicados na Tabela 3.2 foram aplicados para se conhecer o efeito da amplitude e frequência de pulsação. Quando se manteve a frequência constante e variou-se a amplitude de pulsação da alimentação de arame (testes 1-B, 2 e 3 da Tabela 3.2), é interessante apontar que se reduziu as distâncias ente vales e picos da tensão com a diminuição da amplitude de pulsação, mas pouca alteração se nota em relação à corrente. A Figura 3.4 ilustra esta situação comparando o Teste 1-B (6 mm de amplitude de pulsação) e o Teste 2 (4 mm de amplitude de pulsação). Quando se manteve a amplitude constante e variou-se a frequência de pulsação da velocidade de arame (testes 2, 4 e 5 da Tabela 3.2), foi possível perceber que os oscilogramas de tensão e corrente se comportam de forma similar ao apresentado na Figura 3.3, apresentando oscilações periódicas na mesma frequência de pulsação da velocidade do arame.

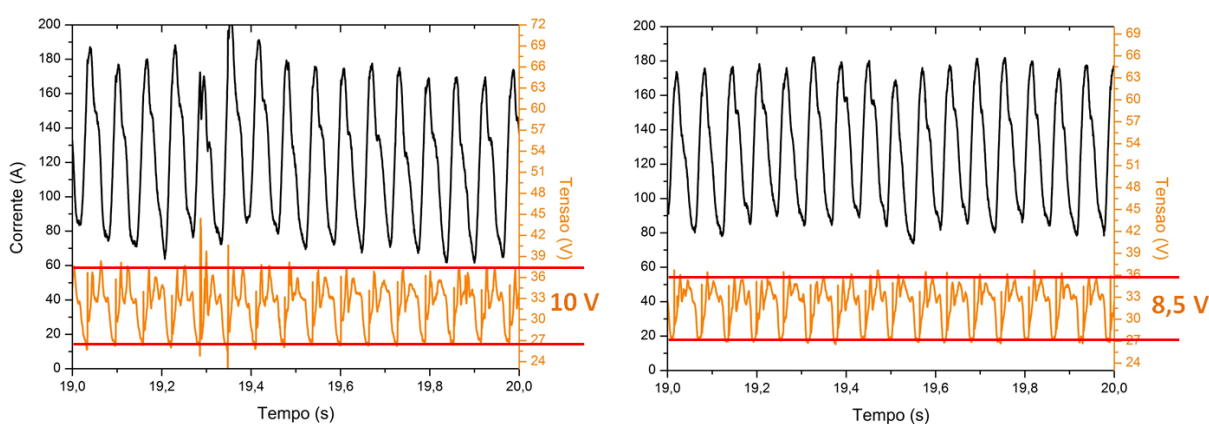


Figura 3.3 - Oscilogramas de corrente e tensão monitorados para o Teste 1-B (à esquerda) e Teste 2 (à direita)

Os valores médios e eficazes de corrente e tensão para os testes executados são mostrados na Tabela 3.3. Ao comparar os valores médios e eficazes de corrente do teste referência (Teste 1-A) e dos testes utilizando pulsação do arame (Teste 1-B ao Teste 5), nota-se uma redução das correntes médias e eficazes. Isto quer dizer que, para uma mesma velocidade de alimentação, a pulsação do arame consegue manter a mesma taxa de fusão com menores valores de corrente, evidenciando mais uma vez o efeito da pulsação da velocidade de alimentação do arame sobre o desempenho do processo. É importante apontar que se a taxa de fusão é a mesma a uma corrente maior, o comprimento livre do arame-eletrodo tornou-se maior. Assim, o comprimento de arco com alimentação pulsada é menor. Esta característica pode ser utilizada no futuro para desenvolver métodos alternativos para o processo MIG/MAG.

Tabela 3.3 - Valores de corrente (I) e tensão (U) médias e eficazes monitorados para os testes da Tabela 3.2

Testes	$I_{média}$ (A)	I_{rms} (A)	$U_{média}$ (V)	U_{rms} (V)
1-A	145,7	146,8	31,5	31,6
1-B	123,7	130,2	32,1	32,3
2	126,5	131,5	32	32,1
3	129,6	133,7	31,9	32
4	129,8	132,3	32	32,1
5	128,7	132	32	32,1

3.2.2 Macrografias da seção transversal

A Figura 3.5 mostra o perfil da seção transversal de cada um dos testes. A Tabela 3.4 apresenta as características geométricas (valores de largura, penetração e altura do reforço) dos cordões realizados com a parametrização mostrada na Tabela 3.2. A pulsação do arame reduziu a largura do cordão de solda em torno de 2 mm e aumentou a altura do reforço em torno de 0,5 mm, quando comparado ao cordão do Teste 1-A (sem pulsação). Nota-se também que a pulsação concentrou a penetração no centro do cordão para todos os casos, independentemente da frequência ou amplitude utilizadas, modificando a forma do cordão de solda. Estes fenômenos poderiam ser explicados por um menor comprimento de arco, o que confirmaria a hipótese do aumento do comprimento livre do arame-eletrodo quando se aplica pulsação da velocidade de alimentação do arame. Um menor comprimento induz o arco a ser mais concentrado e com menor distribuição de calor pelas laterais do cordão em formação.

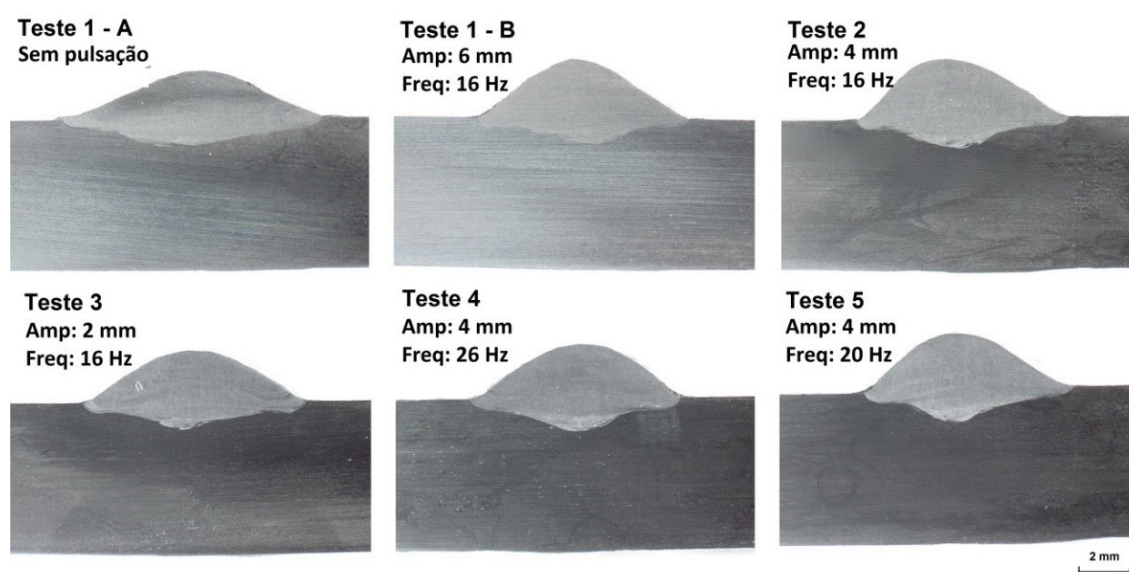


Figura 3.4 - Aspectos geométricos dos cordões de solda resultantes dos testes conforme Tabela 3.2

Tabela 3.4 - Valores medidos de largura, penetração e altura do reforço dos cordões de solda resultantes dos testes da Tabela 3.2

Teste	Largura (mm)	Penetração (mm)	Altura do Reforço (mm)
1-A	10,34	1,06	1,81
1-B	8,39	1,02	2,35
2	8,48	1,13	2,32
3	8,78	1,02	2,04
4	8,29	1,12	2,15
5	8,35	1,27	2,32

CAPÍTULO IV

ANÁLISE DA DINÂMICA DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA INDUZIDA POR IMPULSO MECÂNICO NA SOLDAGEM MIG/MAG

Com base nos testes exploratórios descritos no Capítulo III e visando uma melhor compreensão dos efeitos da pulsação da alimentação de arame sobre o desempenho do processo, foram propostos novos testes com filmagens da transferência metálica através da técnica de shadowgrafia aplicada à soldagem. Os resultados encontrados serão discutidos neste capítulo.

4.1 Metodologia

4.1.1 Materiais

A Figura 4.1 apresenta a bancada experimental utilizada para execução dos testes. Foi utilizada uma câmera de alta velocidade Fastec Imaging HiSpec 5 8 GB, com lentes Nikon f1/4 135 mm, filtro ótico passa banda Chroma RET633/5x com faixa de $632,8 \pm 5$ nm e um laser He-Ne de 20 mW. A abertura da lente foi ajustada em f1/4 e a velocidade do obturador em 1/200000. As imagens foram adquiridas a uma taxa de 2000 quadros por segundo. Os sinais de tensão e corrente do processo de soldagem foram adquiridos por um sistema A/D a uma frequência de 5 kHz. Foram realizadas soldagens de simples deposição sobre placas de teste de aço ASTM 1020, confeccionadas a partir de barras chatas com dimensões de 160 x 31,75 x 6,35 mm. Foi utilizado um arame maciço da classe AWS ER70S-6, com diâmetro 1,0 mm e o gás

de proteção foi Argônio-25%CO₂ com vazão regulada em 16 L/min. A soldagem foi realizada com o uso de uma fonte eletrônica de soldagem multiprocesso IMC Digiplus A7. O pulsador por pulmão ativo com motor linear foi acoplado ao alimentador. A movimentação da peça foi feita por uma mesa de comando numérico de 3 eixos.

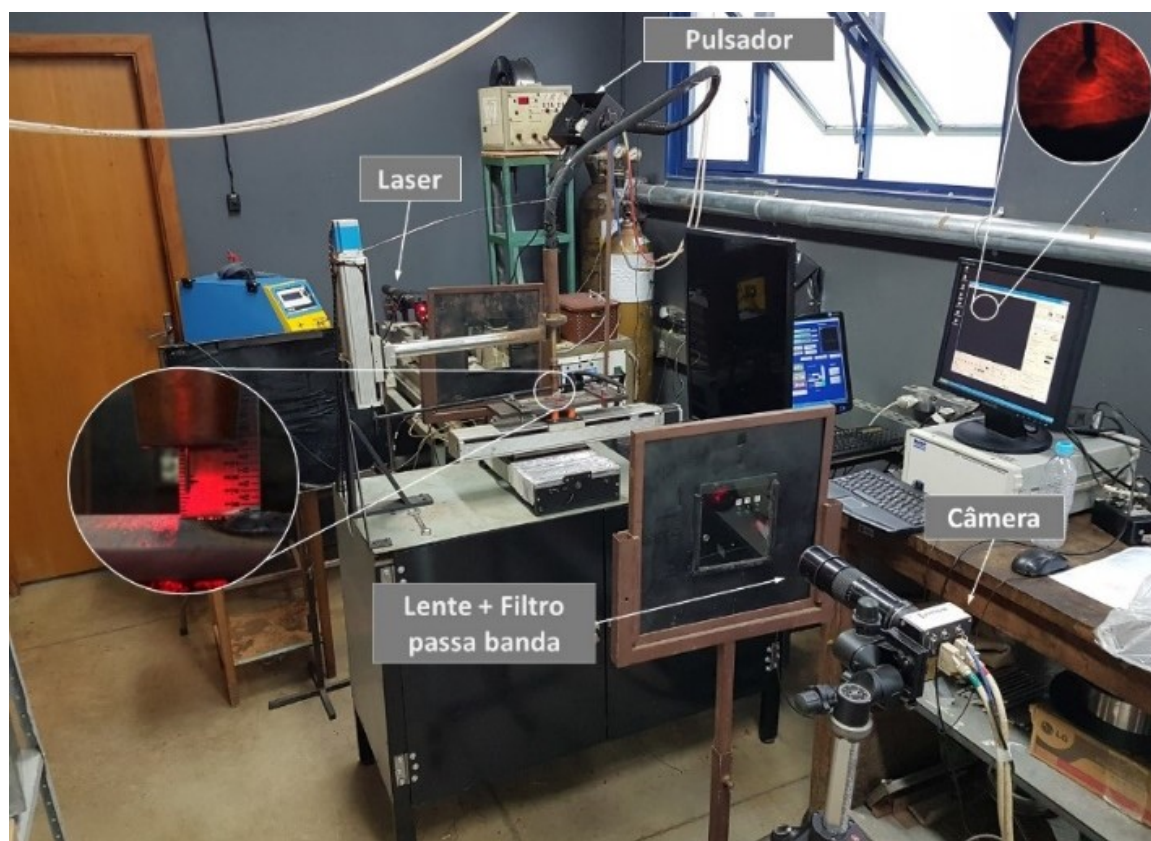


Figura 4.1 - Bancada experimental para filmagem da transferência metálica com a técnica de shadowgrafia

4.1.2 Parâmetros selecionados

Os parâmetros de soldagem e de pulsação são mostrados na Tabela 4.1. Nos testes 1, 2, 3 e 4 foi utilizada a fonte no modo de operação em tensão constante (UC). Para os testes 5, 6 e 7 a fonte foi programada no modo corrente constante (CC). Foram mantidos constantes para todos os testes os seguintes parâmetros: Velocidade de soldagem = 20 cm/min; DBCP = 19 mm; Velocidade de alimentação = 4,8 m/min; Amplitude de pulsação do arame = 4 mm. A pulsação da alimentação foi programada de modo que os avanços e recuos do pulsador são feitos com a mesma aceleração em todos os testes, a frequência é variada de acordo com o tempo de parada do motor nas posições de flexão máxima do conduíte, que correspondem à posição de recuo máximo do arame, conforme a Figura 2.20.

Tabela 4.1 - Parâmetros selecionados para os testes com filmagem

Teste	Frequência de pulsação [Hz]	Fonte	Tensão Regulada [V]	Corrente Regulada [A]	U _{média} Monitorada (V)	I _{média} Monitorada (A)
1	0	UC	31,5	-	33,73	153,49
2	8				33,92	148,93
3	16				33,71	149,07
4	26				33,91	149,06
5	0	CC	-	155	33,30	154,14
6	8				35,24	154,26
7	16				35,30	154,25

4.1.3 Medições e cálculos de Frequência de destacamento de gotas

Através dos vídeos adquiridos foram registrados os intervalos de tempo entre o destacamento de cada gota, para trinta gotas consecutivas. A média desses intervalos de tempo representa o período de destacamento de gotas e o valor inverso corresponde à frequência de destacamento de gotas ($f_d = 1/T_d$).

4.1.4 Medições e cálculos de volume e massa das gotas

Através dos vídeos foram separados os quadros representativos de uma sequência de destacamento de oito gotas para cada um dos testes propostos. A Figura 4.2 exemplifica quatro sequências de destacamento de gotas para um dos testes.

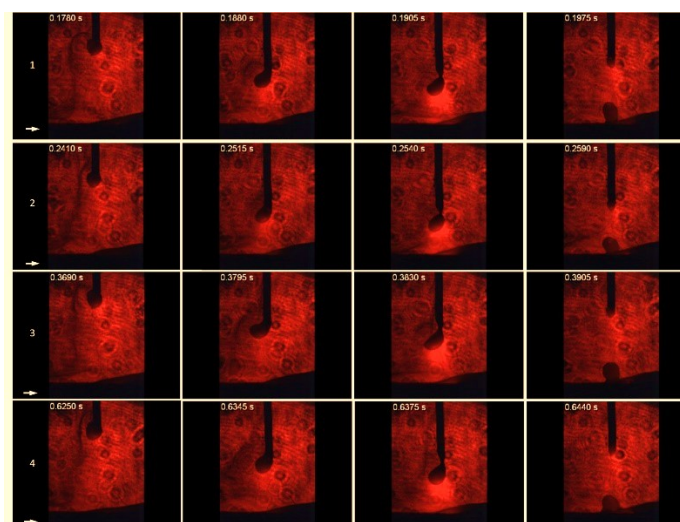


Figura 4.2 – Exemplo de quatro sequências de quadros selecionadas para o teste 16 Hz com fonte UC

Devido ao modo de transferência metálica globular ser repulsivo, em razão dos parâmetros selecionados, principalmente pelo gás de proteção utilizado (Ar+25%CO₂) a gota não assume uma forma perfeitamente esférica. Por isto, para medição do volume, as gotas foram tratadas como elipsoides (Figura 4.3). Os raios menor e maior (a e b) foram medidos através do *software* ImageJ®, e o valor do terceiro raio foi considerado igual ao raio menor (c=b). A Figura 4.4 mostra um exemplo de medição dos raios menor e maior da gota. O volume da elipsoide foi calculado de acordo com a Equação 4.1. A massa das gotas pode ser calculada a partir da relação entre volume e densidade do metal líquido ($m_g = \rho \cdot V_g$). A densidade de 7040 kg/m³ foi adotada para o aço em estado líquido (RYWOTYCKI, 2014).

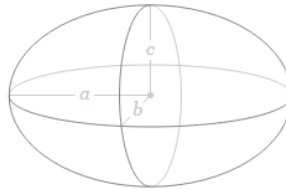


Figura 4.3 - Elipsoide de raios a,b e c (BYJU'S, 2019)

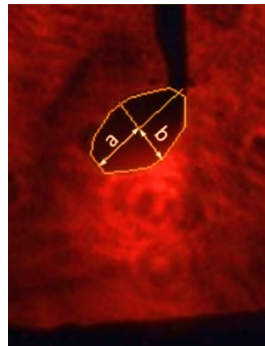


Figura 4.4 - Exemplo do método de medição da geometria da gota

$$V_g = \frac{4\pi}{3} \cdot a \cdot b^2 \quad (4.1)$$

4.1.5 Medições e cálculos de velocidade das gotas em voo

Para os cálculos das velocidades associadas ao voo da gota em direção à poça de fusão, foram separados dois quadros distintos para cada gota destacada (um logo após o destacamento e outro logo ao tocar a poça de fusão). A Figura 4.5 mostra a metodologia de medição da distância percorrida pela gota através do *software* ImageJ®. Através do tempo indicado em cada quadro é possível calcular o tempo total de voo. Foram calculadas as distâncias e tempos de oito gotas destacadas de cada teste, a partir de dois frames.

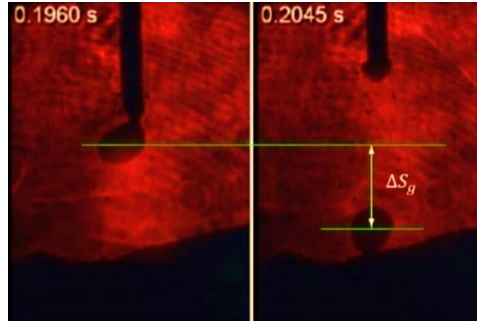


Figura 4.5 - Medição do deslocamento da gota em voo livre

Conhecidas as distâncias percorridas e os tempos é possível calcular a velocidade média através da Equação 4.2. Para o cálculo da velocidade de chegada da gota à poça de fusão foram construídos gráficos de posição *versus* tempo para cada teste, a partir da sequência quadro a quadro do destacamento e queda de uma gota. As distâncias foram medidas com o *software* ImageJ®. A partir do ajuste polinomial de terceiro grau das curvas foi possível calcular as derivadas de modo que a primeira derivada corresponde à equação de velocidade em função do tempo (Equação 4.3). A seleção do polinômio de terceiro grau para o ajuste de curva é justificada pela suposição de que a aceleração é variável durante a trajetória da gota. Substituindo-se o valor final de tempo de voo livre da gota foi possível estimar a velocidade de chegada da gota à poça de fusão. A Figura 4.6 mostra as curvas construídas para os testes de acordo com a frequência de pulsação. Deste modo, as velocidades finais de todos os testes foram determinadas.

$$v_m = \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (4.2)$$

$$v(t) = \frac{dX(t)}{dt} \quad (4.3)$$

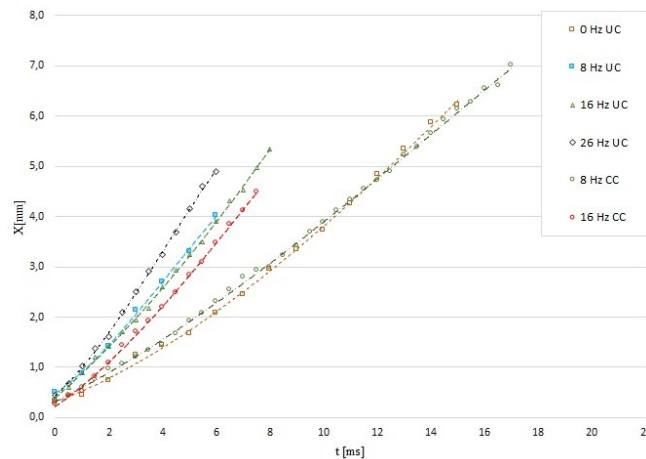


Figura 4.6 - Curvas de Posição *versus* Tempo construídas para cada teste

4.2 Resultados e Discussão

4.2.1 Frequência de destacamento e regularidade das gotas

O gráfico da Figura 4.7(a) mostra os valores de tempo médio de destacamento entre gotas em função da frequência de pulsação e modo de operação testados. Observa-se que o desvio padrão de cada teste é um indicio representativo da regularidade de formação das gotas durante o processo. Um desvio padrão maior indica uma maior variabilidade nos tempos de destacamento. Chama-se atenção para o fato de que esse tempo está diretamente relacionado ao crescimento da gota. Portanto, essa maior variabilidade no tempo implica também maior variabilidade do tamanho das gotas destacadas.

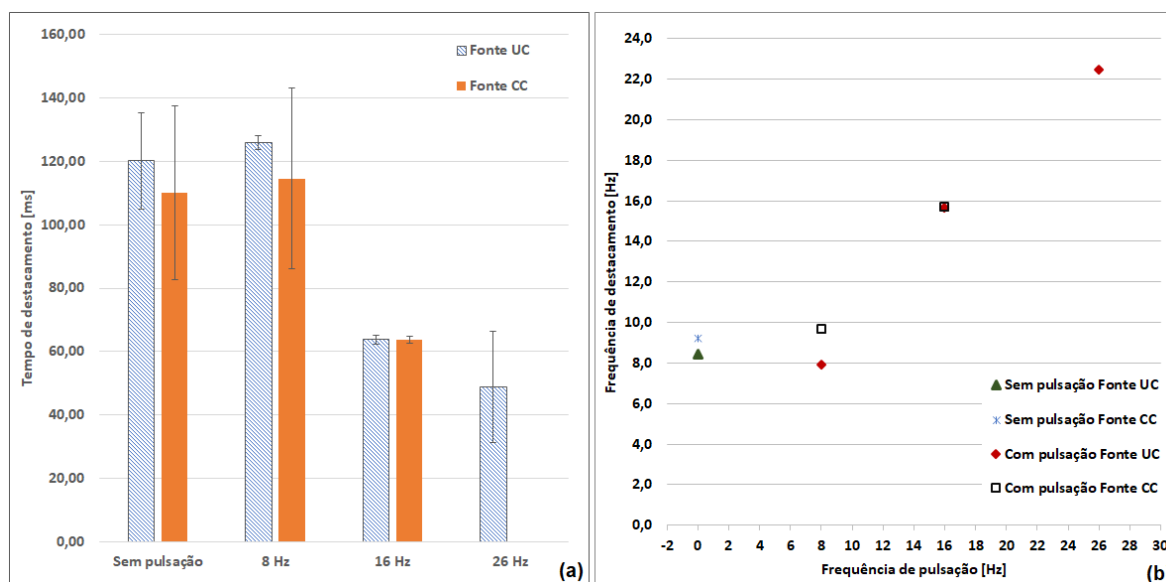


Figura 4.7 - (a) Tempo médio de destacamento da gota em função do modo de operação e frequência de pulsação; (b) Frequência de destacamento em função do modo da fonte e frequência de pulsação

Com base nos desvios padrão, nota-se que houve maior regularidade quando utilizada fonte no modo tensão constante (UC) com frequências de pulsação de 8 e 16 Hz e no modo de corrente constante (CC) com frequência de pulsação de 16 Hz. Cabe lembrar que sem a ação de pulsação mecânica o destacamento é governado principalmente pelo crescimento da gota devido à taxa de fusão, o que o torna mais irregular. A Figura 4.7(b) mostra a relação entre frequência de destacamento e frequência de pulsação imposta. O resultado complementa a ideia de que os casos 8 e 16 Hz (Fonte UC) e 16 Hz (Fonte CC) possuem maior regularidade na transferência das gotas. A compatibilidade entre as frequências de destacamento e de pulsação para estes casos evidencia que a transferência das gotas ocorre em sincronia com a ação mecânica da pulsação de modo que a cada movimento de avanço do arame uma gota é destacada. Para a frequência de pulsação de 26 Hz (Fonte UC), observa-se que a frequência de

destacamento é inferior à de pulsação (Figura 4.7(b)). A sincronia entre a ação mecânica de impulso e o destacamento de gotas não é precisa, nesse caso, de modo que a regularidade da transferência é inferior. Isto ocorre pois a ação mecânica da pulsação se torna mais rápida e, em diversas ocorrências, durante o movimento de avanço do arame, a gota ainda não cresceu o suficiente para se destacar. A Figura 4.8 mostra uma sequência de quadros onde ocorre o avanço da ponta do arame, porém a gota formada não se destaca.

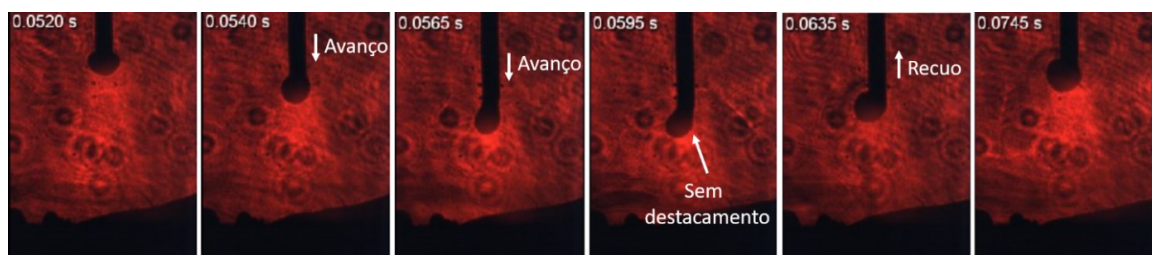


Figura 4.8 - Ciclo de avanço e retrocesso do arame eletrodo em que a gota não se destaca 26 Hz (Fonte UC)

Na Figura 4.7 (a), nos casos sem pulsação, nota-se uma redução no tempo médio de destacamento quando utilizada a fonte no modo corrente constante (Fonte CC) em relação ao teste com modo de tensão constante (Fonte UC). Isto se deve ao fato de que ao trabalhar com a fonte no modo tensão constante, ocorre o fenômeno da autocorreção do comprimento do arco. No caso da transferência metálica globular, o arco se torna mais curto à medida que a gota cresce, consequentemente a corrente tende a crescer. No instante em que a gota se destaca o arco volta ao comprimento original e a corrente decresce. Este fenômeno não é observado ao empregar a Fonte CC. Neste caso, a corrente é fixada em um patamar (igual ao valor médio do caso com fonte UC) e a gota atinge seu diâmetro crítico mais rapidamente, implicando em um menor tempo de destacamento.

Também é observado que nos testes com frequência de pulsação de 8 Hz que ao utilizar a fonte no modo corrente constante (8 Hz Fonte CC) a regularidade é inferior quando comparada ao teste de mesma frequência e fonte no modo tensão constante (8 Hz Fonte UC). Conforme discutido anteriormente, trabalhando-se com a fonte no modo tensão constante o valor da corrente fica sujeito a transientes de acordo com os movimentos de avanço e recuo do arame. Já no modo de corrente constante, esses transientes não ocorrem. Durante o recuo do arame a corrente permanece em um patamar mais alto. Deste modo, no teste 8 Hz com Fonte CC ocorre o destacamento de diversas gotas antes do fim do movimento de avanço. A Figura 4.9 mostra uma sequência de quadros da transferência de uma gota tipicamente observada neste caso.

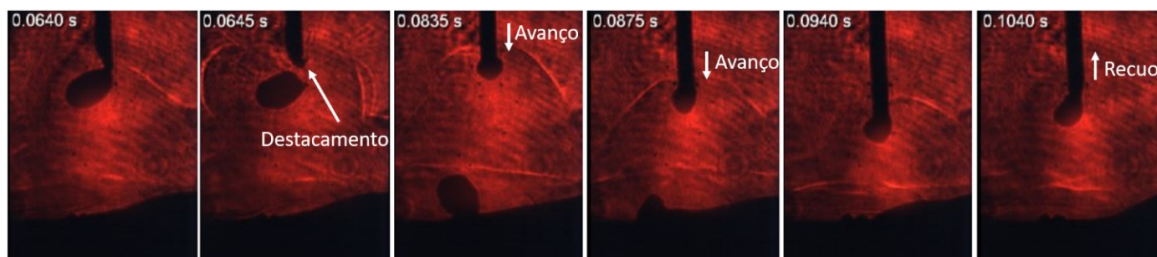


Figura 4.9 - Destacamento irregular típico do caso com pulsação de 8 Hz e fonte CC

No entanto, para frequência de 16 Hz a regularidade da transferência foi similar entre os dois modos de operação da fonte. É importante salientar que há uma diminuição do volume das gotas destacadas na condição de 16 Hz. Nesta situação, a ação mecânica do impulso se mostra quase sempre efetiva para o destacamento das gotas, de modo que, mesmo com a diferença no comportamento da corrente (inerente ao modo de operação da fonte), a transferência metálica ocorre de forma similar.

4.2.2 Volume e massa das gotas

O gráfico da Figura 4.10 mostra os valores calculados de volume e massa média para cada condição testada. Fica evidente a tendência de diminuição do tamanho da gota em função do aumento da frequência de pulsação empregada. Isto indica que a ação mecânica do impulso é capaz de afetar o destacamento das gotas. Uma força de impulso adicional, decorrente do avanço e recuo rápido do arame, possui magnitude significativa diante das demais forças que governam o destacamento na transferência metálica globular (peso e força devido a tensão superficial).

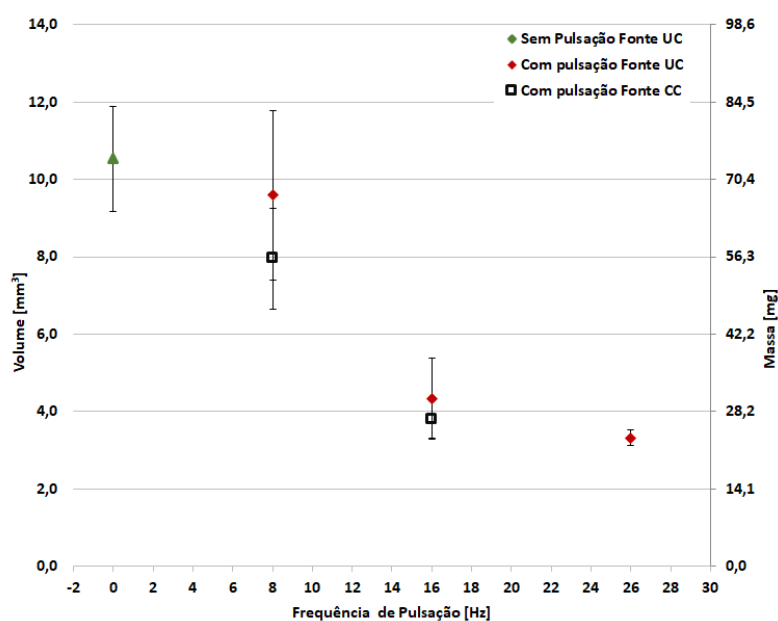


Figura 4.10 - Médias dos volumes e massas calculados para os testes em função da frequência de pulsação

Nos testes com pulsação de 8 Hz, observa-se que o emprego de fonte do tipo corrente constante resulta no destacamento gotas menores. Conforme discutido anteriormente, nesta condição o destacamento das gotas ocorre em períodos irregulares e com frequência maior que a de pulsação, resultando em gotas menores. Nos testes com pulsação de 16 Hz também não se observa uma diferença significativa em relação ao tamanho das gotas quando comparados os casos com fonte no modo corrente e fonte no modo tensão constante. Porém há um indicativo de maior regularidade no caso de fonte no modo corrente constante devido ao menor desvio padrão referente às medições de massa das gotas.

4.2.3 Análise qualitativa das forças envolvidas no destacamento das gotas

Na transferência metálica globular convencional as duas principais forças atuantes na iminência do destacamento são devido à tensão superficial e a força gravitacional. A força devido a tensão superficial (F_γ) depende do diâmetro da gota (d_g) e o coeficiente de tensão superficial (γ), pode ser estimada de acordo Equação 4.4. A força gravitacional (F_g) depende da massa da gota (m_g) e da aceleração da gravidade (g), conforme a Equação 4.5. Conforme discutido no subcapítulo 2.2.1, a gota cresce até que a força gravitacional (proporcional ao cubo do diâmetro) se torne superior à força devido à tensão superficial (diretamente proporcional ao diâmetro). A Figura 4.11 mostra o modelo físico simplificado do destacamento de uma gota na transferência globular convencional.

$$F_\gamma = \pi \cdot d_g \cdot \gamma \quad (4.4)$$

$$F_g = m_g \cdot g \quad (4.5)$$

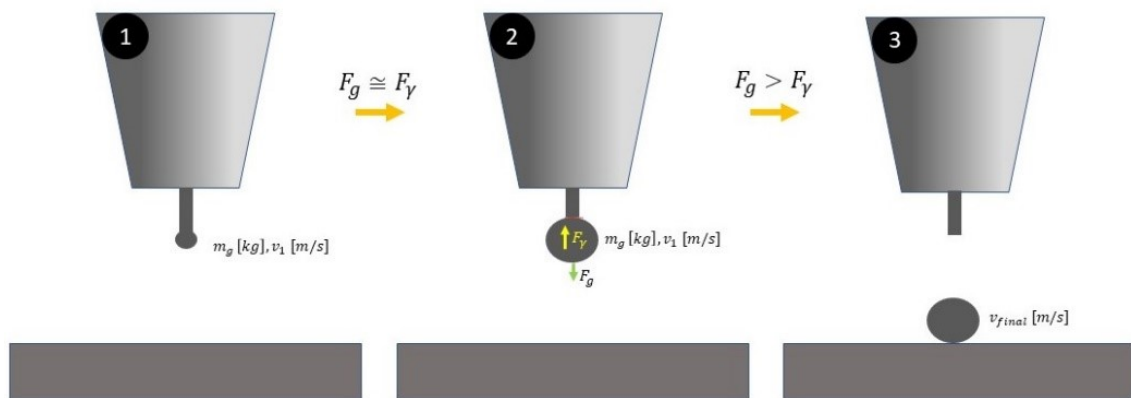


Figura 4.11 - Modelo físico simplificado do destacamento da gota durante a transferência metálica globular convencional. m_g [kg] massa da gota; F_g – Força gravitacional; F_γ - Força devido à tensão superficial

Por outro lado, com base nos resultados anteriores foi observado que o emprego de pulsação mecânica da ponta do arame resulta no destacamento de gotas menores quando comparado ao caso sem pulsação. Uma vez que a força devido à tensão superficial é superada antes que a gota atinja um diâmetro crítico, fica evidenciada a capacidade da ação mecânica de pulsação de impor uma força adicional à gota no sentido favorável ao destacamento da gota. O impulso é uma grandeza física descrita como uma variação na quantidade de movimento devido à ação de uma força em um intervalo de tempo. A força associada ao impulso é determinada pela razão entre a variação na quantidade de movimento e o tempo decorrido. Pode ser estimada de acordo com a Equação 4.6 onde: F_i é a força de impulso; m_i é a massa inicial; v_i é a velocidade inicial; v_f é a velocidade final; m_f é a velocidade final e t é o tempo. A Figura 4.12 mostra o modelo físico simplificado do destacamento de uma gota com ação da força de impulso devido à pulsação mecânica.

$$F_i = \frac{m_f \cdot v_f - m_i \cdot v_i}{\Delta t} \quad (4.6)$$

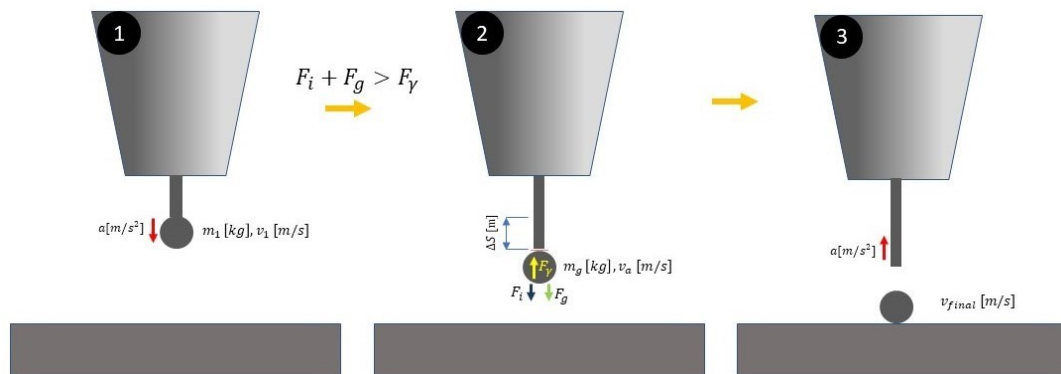


Figura 4.12 - Modelo físico simplificado do destacamento da gota durante a transferência metálica globular por impulso devido à pulsação. a [m/s^2] – aceleração do arame; ΔS [m] – distância percorrida pela ponta do arame no avanço; m_g [kg] massa da gota; F_i – Força de impulso; F_g – Força gravitacional; F_γ – Força devido à tensão superficial

Através da Equação 4.6 e do modelo físico da figura 4.12 observa-se que a força de impulso depende não somente da variação imposta pelo arame à gota como também da massa da própria gota. Ou seja, assim como as forças gravitacional e devido à tensão superficial, a força de impulso também é influenciada pelo crescimento das gotas. Atenta-se ao fato de que os movimentos de avanço e retrocesso do arame são feitos com os mesmos parâmetros em todos os testes com pulsação. As diferentes frequências de pulsação são obtidas a partir dos tempos de parada em posição de recuo. Ao analisar o caso com pulsação de 26 Hz e fonte no modo tensão constante, foi constatado que as gotas são menores devido ao menor tempo disponível

para crescimento (Figuras 4.7 e 4.10). Portanto, pode-se afirmar que as gotas que não se destacam ao fim do avanço do arame (Figura 4.9) não cresceram o suficiente para que as forças gravitacionais (F_g) e de impulso (F_i) superassem a força devido à tensão superficial (F_γ). Existe, portanto, um diâmetro mínimo que a gota deve atingir para ser destacada ao fim do movimento de avanço, de forma análoga ao diâmetro crítico.

4.3.4 Velocidade de voo das gotas

Com base nos resultados de velocidade média de voo das gotas (Figura 4.13) constata-se que o emprego da pulsação, de modo geral, é capaz de acelerar as gotas. No entanto, no caso de pulsação com 8 Hz e fonte no modo CC observa-se uma velocidade média inferior aos demais. Conforme discutido anteriormente, o uso da fonte no modo corrente constante nestas condições resultou em uma transferência metálica irregular, onde a gota se destaca fora de sincronia com a pulsação mecânica. Em diversas ocorrências as gotas se destacam ainda durante o movimento de recuo do arame, de modo que são lançadas em direções aleatórias, aumentando a tendência da gota de girar em torno de seu próprio eixo e aumentando sua trajetória até a poça. Consequentemente, resulta em uma velocidade média de voo menor. A Figura 4.14 mostra uma sequência de quadros onde este fenômeno ocorre.

Em contrapartida, nos casos onde o destacamento das gotas ocorre em sincronia com a ação mecânica da pulsação (8 Hz UC, 16 Hz UC e CC) a aceleração adicional imposta pelo avanço rápido do arame favorece o direcionamento linear da gota rumo à poça de fusão, sem que a gota gire, fato que contribui com a regularidade da transferência. Nos testes com pulsação (8, 16 e 26 Hz) e fonte no modo tensão constante, observa-se que a velocidade média de voo das gotas é similar. A Figura 4.15 ilustra essa condição durante o teste com 16 Hz e fonte UC.

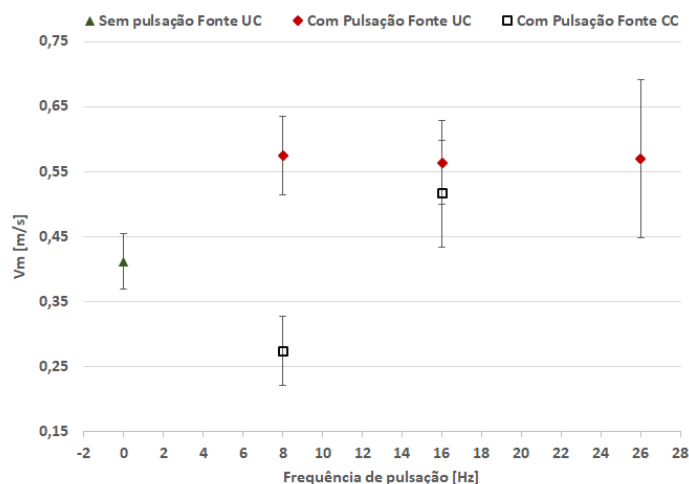


Figura 4.13 - Velocidade média das gotas a partir do destacamento até a chegada à poça de fusão

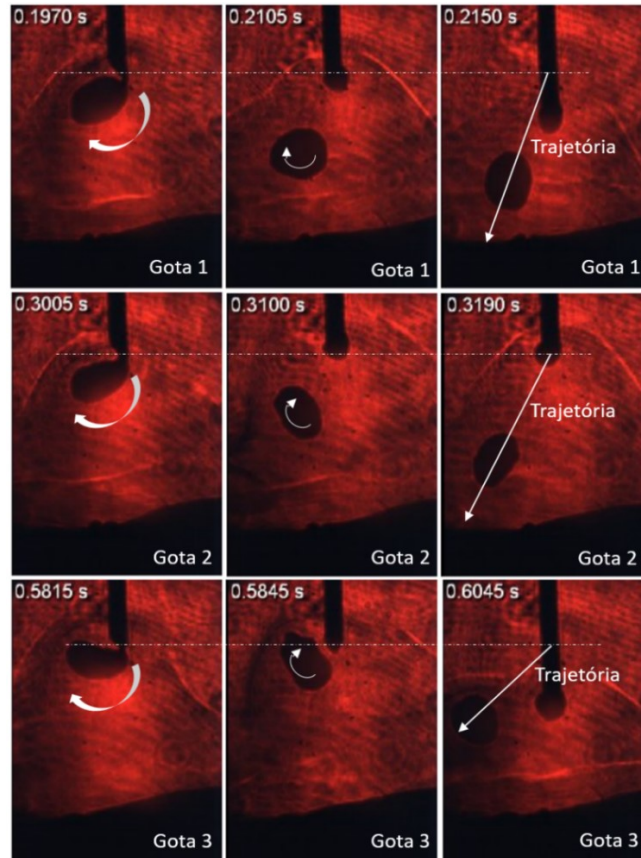


Figura 4.14 - Sequências de três quadros indicando as trajetórias de gotas destacadas durante o teste 8 Hz com fonte de corrente constante

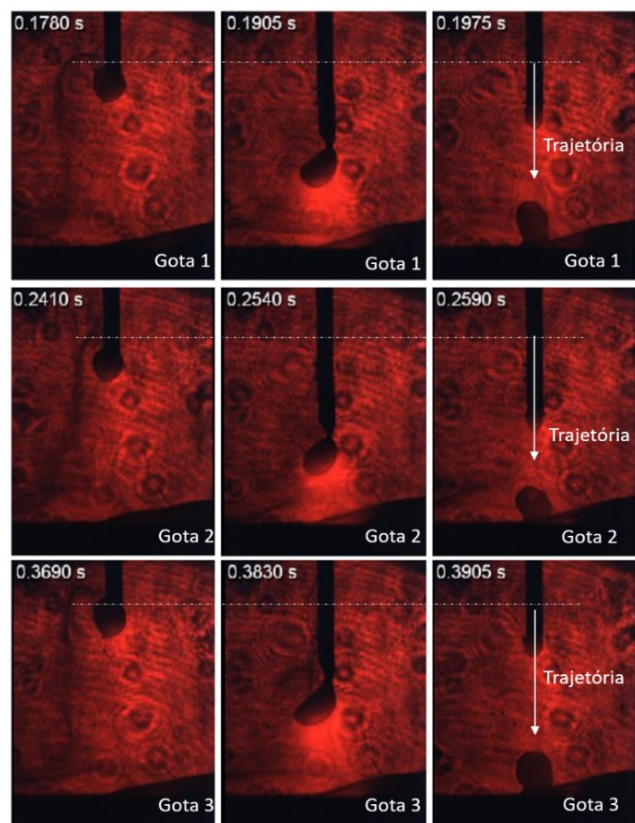


Figura 4.15 - Sequências de três quadros indicando as trajetórias de gotas destacadas durante o teste 16 Hz com fonte de tensão constante

Com base nas curvas de posição *versus* tempo das gotas (Figura 4.6) foi estimada a velocidade de chegada da gota à poça de fusão. Os resultados mostrados no gráfico da Figura 4.16 indicam coerência com os resultados de velocidade média (Figura 4.13). A velocidade final da gota é representativa pois é a velocidade na iminência do mergulho da gota na poça de fusão. Esta velocidade está diretamente relacionada com a energia cinética da gota.

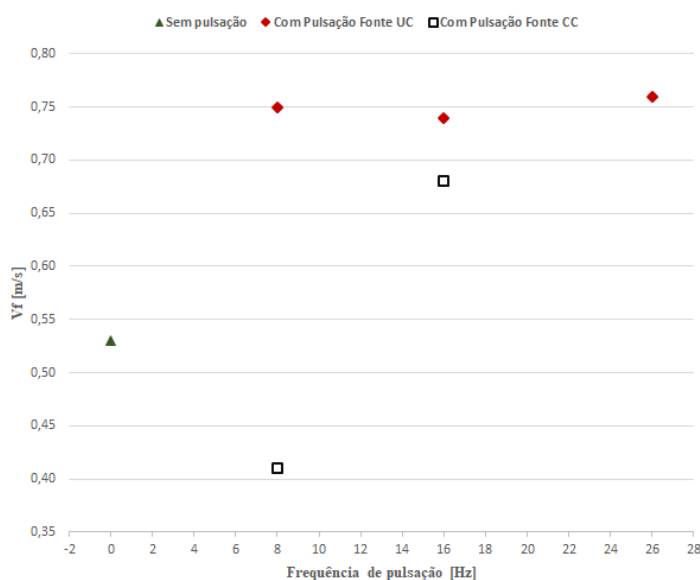


Figura 4.16 - Velocidades finais de voo das gotas para as frequências de pulsação 0, 8, 16 e 26 Hz

4.3.5 Aspectos geométricos dos cordões

As características geométricas dos cordões foram mensuradas seguindo a mesma metodologia descrita no subcapítulo 3.1.3. A Figura 4.17 apresenta as secções transversais dos cordões de solda. Nos casos onde a pulsação foi utilizada, em consonância com os resultados apresentados no subcapítulo 3.2.2, o emprego da pulsação da alimentação resultou em cordões de menor largura e concentrando a penetração no centro (exceto na condição 8 Hz CC).

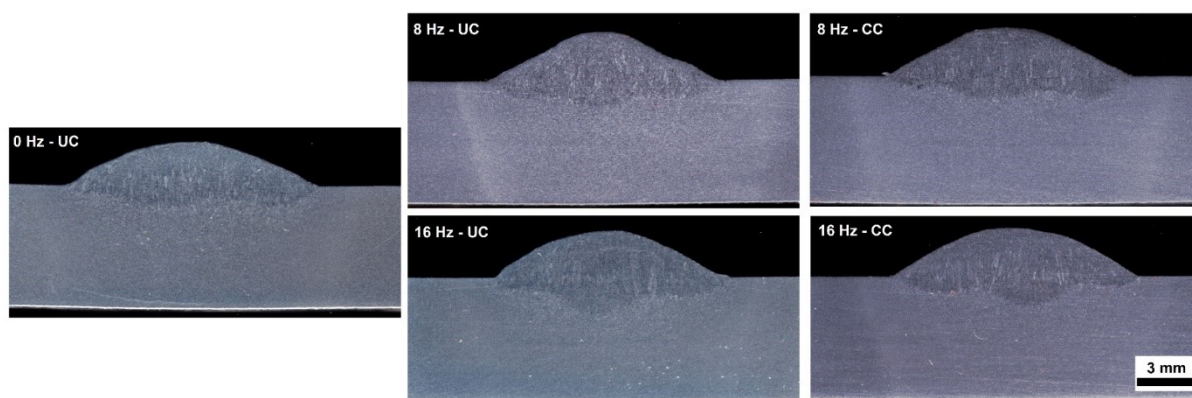


Figura 4.17 - Macrografias da seção transversal dos cordões de solda nas condições testadas

Os valores medidos de penetração são apresentados na Figura 4.18. Observa-se que com o aumento da frequência de pulsação, também ocorre aumento na penetração, em ambos os modos de operação da fonte (tensão constante e corrente constante). No modo de tensão constante, o teste com pulsação de 16 Hz apresenta penetração 75% maior em relação ao teste sem pulsação. Com base nos resultados discutidos anteriormente, há indícios de que a diminuição no tamanho das gotas, o aumento na velocidade e a melhor regularidade favoreçam as condições hidrodinâmicas de mergulho da gota na poça de fusão e resulte em maior penetração. Chama-se a atenção também para o efeito da diminuição no comprimento de arco, discutido no subcapítulo 3.2.2.

Em relação ao teste com frequência de 8 Hz e fonte no modo corrente constante, ressaltam-se os fenômenos inerentes a essa condição discutidos anteriormente. A transferência metálica não sincronizada com a pulsação resultam em uma menor regularidade e menor velocidade das gotas, fato que torna a morfologia do cordão similar ao caso sem pulsação.

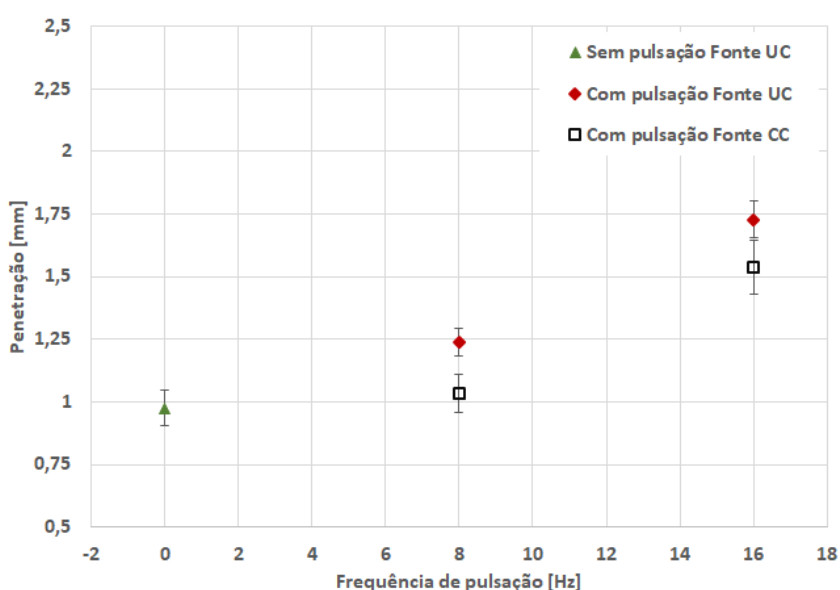


Figura 4.18 - Medidas de penetração dos cordões de solda para as frequências de 0, 8 e 16 Hz

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

O presente trabalho permitiu observar os seguintes aspectos a respeito da alimentação pulsada de arame eletrodo no processo MIG/MAG com transferência metálica globular, nas condições e parâmetros selecionados:

- As oscilações nos sinais elétricos acompanham a frequência e a magnitude da pulsação imposta.
- As variações observadas na corrente elétrica quando se aplica a pulsação, com fonte no modo de tensão constante, são atribuídas ao fenômeno da autorregulagem do comprimento do arco. Os valores de corrente média foram menores quando utilizada a pulsação.
- A pulsação da alimentação tende a reduzir o tamanho médio das gotas destacadas devido à força adicional de impulso.
- A frequência de pulsação 8 Hz apresenta um comportamento próximo ao caso sem pulsação. No modo de tensão constante, a pulsação foi capaz de aumentar a regularidade. Já no modo de corrente constante, a transferência se tornou irregular e a trajetória das gotas em direção à poça foi afetada.
- A frequência de pulsação, 16 Hz nos modos de operação tensão constante e corrente constante, se mostra capaz de regularizar a transferência metálica. O destacamento de gotas ocorre em sincronia com a ação mecânica da pulsação. Além disso, proporciona melhor direcionamento do voo das gotas em direção à poça de fusão. Esta condição resulta em cordões com penetração cerca de 75% maior quando comparado ao caso sem pulsação.

- A frequência de pulsação 26 Hz resultou em uma drástica redução do tamanho das gotas. Por isso, o destacamento não ocorre sempre em sincronia com a ação mecânica, resultando em uma transferência irregular, quando comparada ao caso com 16 Hz.
- A pulsação da alimentação foi capaz de aumentar as velocidades média e final de voo das gotas em todos os casos, exceto com pulsação de 8 Hz e fonte no modo corrente constante.
- A pulsação da alimentação é capaz de alterar a morfologia dos cordões de solda. Em geral, a largura torna-se menor e a penetração maior e mais concentrada no centro do cordão, exceto com pulsação de 8 Hz e fonte no modo corrente constante.

Conclui-se, portanto, que a pulsação de alimentação é capaz afetar o desempenho do processo estudado em termos de sinais elétricos, morfologia dos cordões de solda e dinâmica da transferência metálica. Foi observada a capacidade de regularizar a transferência metálica e aumentar a penetração com o emprego da pulsação. constata-se a eficácia do dispositivo de pulmão ativo com acionamento por motor linear na promoção da pulsação da alimentação de arame. Além disso, o presente trabalho apresenta características da alimentação pulsada de material nas condições estudadas que podem ser utilizadas no desenvolvimento de aplicações inovadoras da técnica.

Sugere-se, para trabalhos futuros, aprofundar a caracterização das forças envolvidas no destacamento das gotas através do desenvolvimento de um modelo matemático. A pulsação da alimentação na transferência metálica globular com novos parâmetros de pulsação e de soldagem, como por exemplo diferentes composições de gás de proteção.

REFÊRENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, P. M. S. **Innovative Process Model of Ti-6Al-4V Additive Layer Manufacturing Using Cold Metal Transfer (CMT)**. 21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference. [S.l.]: [s.n.]. 2010. p. 25-36.

BÁLSAMO, P; VILARINHO, L. O.; SCOTTI, A. Development of an experimental technique for studying metal transfer in welding: synchronized shadowgraphy. **International Journal for the Joining of Materials**, v. 12, n. 1, 2000.

CMT – COLD METAL TRANSFER: THE COLD WELDING PROCESS FOR PREMIUM QUALITY. **Fronius**. Disponível em: <<https://www.fronius.com/en/welding-technology/our-expertise/welding-processes/cmt>>. Acesso em: 07 maio 2019.

DUTRA, J; SILVA R. H. G; MARQUES, C.. Melting and welding power characteristics of MIG-CMT versus conventional MIG for aluminum 5183. **Welding International**, 2014.

HIGH Speed Aufnahme microMIG Impulslichtbogen - Schweißen - MIG welding arc. [S.l.]: <https://www.youtube.com/watch?v=nA492-DgsuU&t=77s>. 2010.

JORGE, V. L. et al. Desenvolvimento e Avaliação de Técnicas para Pulsação da Alimentação de Arame em Soldagem a Arco. **Soldagem & Inspeção**, n. 23, maio 2018.

MIRANDA, E. C. et al. **Avaliação do Uso do Tecimento sobre o Nível de Diluição e Geometria do Cordão de Solda na Soldagem TIG com Alimentação Automática de Arame Frio**. [S.l.]. 2015.

P. KAH, R. S. J. M. Advanced gas metal arc welding processes. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 67, n. 1-4, p. 655-674, Julho 2013.

PIKE, G. **Evaluation of the Tip Tig Welding System, a Semi-Automatic Hot Wire GTAW Process, Compared to Manual GTAW**. National Shipbuilding Research Program. Newport News, VA. 2013.

PLASCH, S. **Device For Feeding a Welding Wire to a Welding Device**. US 2016/0059343A1, 21 março 2014.

POSCH, G; Weber, H.; Schmitt, G. **Innovative GMAW solutions for high-alloyed and nickelbase overlays**. OPE 2013. Kalpakkam, India: [s.n.]. 2013.

REIS, R. P et al. **Dispositivo para Pulsação da Alimentação de Arame em Processos de Deposição de Metal por Fusão**. BR 10 2019 012486 5, 2019.

RUDY, J. F. **Development and Application of Dabber Gas Tungsten Arc Welding for Repair of Aircraft Engine, Seal Teeth**. Cincinnati, OH. 1982.

RYWOTYCKI, M. et al. Modelling Liquid Steel Motion Caused by Electromagnetic Stirring in Continuous Casting Steel Process. **Archieves of Metallurgy and Materials**, v. 59, n. 2, 2014.

SANTOS, C. H. A; REIS, R. P. **Desenvolvimento de um Protótipo para Pulsação da Alimentação de Arame na Soldagem TIG**. Universidade Federal de Uberlândia. [S.l.]. 2016.

SCOTTI, A; PONOMAREV, P. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**. 2ª. ed. São Paulo, SP: Artliber Editora Ltda., 2014.

SILVA, R. H. G. et al. Performing higher speeds with dynamic feeding gas tungsten arc welding (GTAW) for pipeline applications. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering** , p. 41:38, 2019.

SILVA, R. H. G. et al.. TIG welding process with dynamic feeding: a characterization approach. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 96, n. 9-12, p. 4467–4475, março 2018.

SILWAL, B; M. S. Effect of vibration and hot-wire gast tungsten arc (GTA) on the geometric shape. **Journal of Materials Processing Tech.**, v. 215, p. 138-145, agosto 2018.

SKS Torch Systems Frontpull. **SKS Welding Systems**. Disponível em: <<https://www.sks-welding.com/en/torch-systems/single-wire/frontpull-7/micromig-micromig-cc.html>>. Acesso em: 10 maio 2019.

TIGSPEED oscillation drive 45 coldwire. **EWM**. Disponível em: <https://www.ewm-sales.com/en/Components_and_accessories/Wire_feeders__replacement_parts_and_accessories/TIG/tigSpeed_oscillation_drive_45_coldwire--090-000181-00502.html>. Acesso em: 07 maio 2019.

TIP TIG Benefits. **TIP TIG**. Disponível em: <<https://tiptig.com/tip-tig-benefits/>>. Acesso em: 09 maio 2019.

VOLUME of an Ellipsoid Formula. **Byju's**. Disponível em: <<https://byjus.com/volume-of-an-ellipsoid-formula/>>. Acesso em: Junho 2019.

WAINER, E. et al.. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo, SP: [s.n.], 1992.

Zhang H. T; Feng J. C. ; He, P. Interfacial phenomena of cold metal transfer (CMT) welding of zinc coated steel and wrought aluminum. **Materials Science and Technology**, v. 24, n. 11, 2008.