

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

KAROLINE MARTINS

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE TECNOLOGIA PARA
ALIMENTAÇÃO DINÂMICA DE ARAME NO PROCESSO GTAW

Joinville

2018

KAROLINE MARTINS

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE TECNOLOGIA PARA
ALIMENTAÇÃO DINÂMICA DE ARAME NO PROCESSO GTAW

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel no Curso de
Graduação em Engenharia Automotiva do
Centro Tecnológico de Joinville da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Vieira da Cunha

Joinville

2018

Dedico este trabalho a toda minha família.
Em especial aos meus pais Odete e Corsino Martins.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que fizeram parte desta jornada junto a mim, contribuindo direta ou indiretamente para minha formação acadêmica.

Aos meus familiares, pelo apoio e incentivo durante todos estes anos. Em especial aos meus pais Odete e Corsino Martins que fizeram de tudo para que eu pudesse chegar até aqui e ir além nas minhas conquistas, sempre gerando forças para me ajudar.

Aos meus irmãos Thiago e Rodrigo Martins por sua parceria e que foram para mim inspiração para a carreira acadêmica. Igualmente ao meu companheiro Marcio Hillebrandt pelo apoio e incentivo incondicional nos momentos difíceis.

Ao meu orientador Tiago Vieira da Cunha pelo conhecimento, experiência, dedicação e técnicas transmitidas durante o período de desenvolvimento deste trabalho.

A todos os meus colegas do LTS pelo companheirismo durante todos estes anos de convívio. Em especial a Anna Louise Voigt pelo apoio e auxílio nas atividades realizadas.

RESUMO

O processo de soldagem TIG é caracterizado pela ampla variedade de utilização na indústria, apresentando-se adequado devido à possibilidade de adaptação às características de soldagem desejada. Deste modo, naturalmente se constitui como um grande campo de estudo e pesquisa na área da tecnologia da soldagem. Nesse contexto, o termo alimentação dinâmica do arame se encontra em evidência, fator pelo qual neste trabalho tem-se por objetivo desenvolver tecnologia própria visando à realização de procedimentos de soldagem GTAW com alimentação dinâmica do arame de adição junto à poça de fusão. Assim, foi desenvolvido um dispositivo constituído de princípio magnético de movimentação. Para caracterização do dispositivo utilizou-se uma bancada de testes constituída pelo dispositivo, duas fontes de corrente constante. Com a bancada composta por esses elementos efetuou-se testes de amplitude e frequência, para verificação da faixa de trabalho e verificação do efeito causado pelo dispositivo ao arame durante a soldagem, para amplitudes entre 2 e 10 mm e frequências de oscilação entre 3 Hz e a frequência máxima possível de operação para a respectiva amplitude. A partir de medições de posição e frequência, foi validada a dinâmica de resposta do dispositivo, e a partir de filmagem em câmera de alta velocidade, o efeito do mesmo ao arame de alimentação durante a soldagem. Por fim foram realizadas soldagens com intuito de verificação dos aspectos morfológicos do cordão. Com os resultados verificou-se que o dispositivo desenvolvido é capaz de realizar a alimentação dinâmica de arame de forma satisfatória sem possuir engaste físico ao arame de adição.

Palavras-chave: TIG. Alimentação dinâmica do arame. Dispositivo magnético.

ABSTRACT

The TIG welding process is characterized by the wide variety of use in the industry being appropriate due to the possibility of adaptation to the desired welding characteristics. For that reason it constitutes a great field of study and research in welding area technology. In this context, where the term dynamic wire feed is in evidence, a factor in which this work has the objective of developing its own technology aiming the accomplishment of GTAW welding procedures with oscillation of the addition wire into the fusing puddle. Thus, a device consisting of magnetic principle of movement was developed. To characterize the device was used a test bench constituted by the device, two sources of constant current, an oscilloscope, two multimeters, a conventional welding source, and a wire puller were used. With the stand made up of these elements, amplitude and frequency tests were carried out to characterize the device and verify the effect caused by the same to the wire during welding for different amplitudes, between 2 and 10 mm and oscillation frequencies between 3 Hz and maximum possible operating frequency for the respective amplitude. From position and frequency measurements, the response dynamics of the device, and from slow motion shooting camera, were have validated the effect of the device to the wire feed during welding. Finally, welding was carried out in order to verify the morphological aspects of the weld bead. With the results we verified that the developed device is capable of performing the wire dynamic oscillation in a satisfactory way without having physical crimping to the addition wire.

Keywords: TIG. Dynamic wire feed. Magnetic device.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Representação esquemática do processo TIG convencional	17
Figura 2 - Dispositivo de alimentação mecanizada de arame, acoplado (a) e não acoplado (b) a tocha de soldagem	18
Figura 3 - Sequência de imagens demonstrativas do modo intermitente de transferência metálica.....	20
Figura 4 – Imagem demonstrativa do modo de transferência metálica em ponte	20
Figura 5 – Cabeçote tracionador de TIP-TIG	22
Figura 6 - Detalhes de uma tocha TIP-TIG	23
Figura 7 - Esquemática dos possíveis posicionamentos do mangote da tocha	24
Figura 8 - Exemplo de sistemas CMT	25
Figura 9 – Representação esquemático do dispositivo (a) e detalhe do posicionamento da bobina (b).....	27
Figura 10 - Representação do ajuste de amplitude	27
Figura 11 - Comparação entre modelo real concebido (a) e em Solidworks (b).....	27
Figura 12 - Imagem detalhada da comparação dos ímãs e placas base real (a) e em.....	27
Figura 13 - Demonstração das configurações do funcionamento do dispositivo na interface no arduíno UNO	27
Figura 14 - Esquemática de um circuito ponte H típica.....	27
Figura 15 – Imagem do conjunto Placa de potência e arduíno UNO	27
Figura 16 - Bancada de ensaios relativo ao funcionamento do dispositivo (a) e posicionamento do potenciômetro (b)	32
Figura 17 - Função de transferência utilizada para descrever a movimentação do dispositivo no tempo (Tensão x Posição).....	33
Figura 18 - Gráficos detalhados de posição para a mesma frequência de 3 Hz	35
Figura 19 - Gráficos que descrevem o movimento de avanço e retorno do dispositivo para diferentes amplitudes e frequência de 3 Hz.....	36
Figura 20 – Frequência limite para amplitude de a) 10 mm e b) 8 mm	38
Figura 21: Frequência limite de operação do dispositivo para cada amplitude de operação ...	39
Figura 22 - Interface do programa Photron Fastcam Analysis	41
Figura 23 - Gráficos referentes ao ensaio de verificação da amplitude para o arame e para o dispositivo (arames estático).....	42

Figura 24 - Gráficos referentes ao ensaio de amplitude para o arame e para o dispositivo (aramé sendo tracionado com 2 m/min).	44
Figura 25 - Gráficos de avanço e retorno do dispositivo e do arame (aramé sendo tracionado com 2 m/min).	46
Figura 26 - Posicionamento do dispositivo e da tocha no tartúlope V1 para realização dos ensaios de soldagem	48
Figura 27 - Esquema para retirada de amostras dos corpos de prova para análise macrográfica	48
Figura 28 - Posicionamento da tocha e bico alimentador de arame, vista lateral (a) e frontal (b)	49
Figura 29 – Sequencia de imagem ilustrativa da transferência metálica através da oscilação do arame	50
Figura 30 – Características morfológicas e superficiais dos cordões de solda obtidos	52
Figura 31 – Gráficos de largura, reforço, penetração e área fundida referentes aos resultados das macrografias dos cordões de solda para o ensaio de variação de velocidade do arame	53
Figura 32 - Resultados do ensaio de variação de frequência para avaliação das características morfológicas e macrografias do cordão.....	54
Figura 33 – Gráficos de largura, reforço, penetração e área fundida referentes aos resultados das macrografias dos cordões de solda para o ensaio de variação de frequência de oscilação do arame	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação posição x Tensão de saída no potenciômetro	33
Tabela 2 – Valores de amplitude e frequência utilizados nos ensaios de verificação da frequência limite e do comportamento	34
Tabela 3: Relação de equações derivadas das funções de posição variando no tempo do dispositivo (equações de velocidade e aceleração).....	37
Tabela 4 - Imagens obtidas para cada taxa de amostragem.....	40
Tabela 5 – Valores de amplitude e frequência utilizados nos ensaios de verificação do comportamento do dispositivo com o arame estático na posição de passagem	41
Tabela 6 - Verificação da velocidade para o arame em movimento	45
Tabela 7- Valores de velocidade de arame e frequência utilizados nos ensaios de soldagem, variando a velocidade do arame	50
Tabela 8 - Valores de velocidade de arame e frequência de oscilação do arame utilizado nos ensaios de soldagem	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AWS – American Welding Society

CMT – Cold Metal Transfer

Dep – Distância Eletrodo Peça

GTAW – Gas-shielded Tungsten Arc Welding

IHM – Interface Homem Máquina

K – Constante de Mola

MIG/MAG – Metal Inert/Active Gas

PFA – Photron Fastcam Analysis

PFV – Photron Fastcam Viewer

TIG – Tungsten Inert Gas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.1 Objetivo Geral	15
1.1.2 Objetivos Específicos	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1 SOLDAGEM TIG	16
2.1.1 Soldagem com alimentação de arame	18
2.2 ALIMENTAÇÃO DINÂMICA DO ARAME	21
2.2.1 TIP-TIG.....	21
2.2.2 Cold Meta Transfer (CMT).....	24
3 DESENVOLVIMENTO.....	25
3.1 ACIONAMENTO DO DISPOSITIVO	27
4 CARACTERIZAÇÃO DO DISPOSITIVO	27
4.1 DETERMINAÇÃO DA CORRENTE NA BOBINA	30
4.2 ENSAIOS DE VERIFICAÇÃO EM BANCADA	31
4.2.1 Montagem do aparato	31
4.2.2 Ensaios de verificação da amplitude e frequência de operação	34
4.3 FILMAGEM COM CÂMERA DE ALTA VELOCIDADE.....	39
4.3.1 Ensaios de verificação da taxa de amostragem.....	39
4.3.2 Filmagem com dispositivo em movimento e arame estático	40
4.3.3 Filmagem com dispositivo em movimento e arame com velocidade constante de avanço	43
5 ENSAIOS DE SOLDAGEM.....	47
5.1 BANCADA DE ENSAIOS DE SOLDAGEM.....	47
5.1.1 Materiais e métodos.....	47
5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SOLDAGEM.....	51
5.2.1 Ensaio variando a velocidade do arame	51
5.2.2 Ensaio variando a frequência de oscilação.....	54
6 CONCLUSÃO.....	57
7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	58
REFERÊNCIAS	59

APÊNDICE A – GRÁFICOS RESULTANTES DO ENSAIO DE FREQUÊNCIA LIMITE DO DISPOSITIVO RELATIVA NO TEMPO PARA CADA AMPLITUDE DE VARIAÇÃO.	61
--	-----------

1 INTRODUÇÃO

A soldagem TIG (Tungsten inert gas) é um dos processos considerados de alto padrão nas indústrias, devido a aspectos mecânicos e qualidade estética em soldas aparentes, como no caso do setor automotivo, alimentício ou que necessitem de um alto grau de controle para soldagem de chapas finas. Também conhecido como Gas-shielded Tungsten Arc Welding (GTAW) é um processo de soldagem a arco que utiliza um eletrodo de tungstênio não consumível. O arco voltaico, assim como a poça de fusão e o próprio eletrodo são protegidos por um gás inerte. Uma das características mais relevantes do processo TIG é a independência quanto à alimentação de arame, podendo ser efetuada soldagem sem adição de material, a chamada soldagem autógena, e a soldagem com adição de material.

Referente à soldagem autógena, a união de uma junta é realizada apenas pela fusão do próprio material existente nas peças a serem soldadas, existindo a necessidade de não haver folgas entre elas para que não ocorram falhas. Em contrapartida, quando as juntas a serem soldadas possuem folgas, há a necessidade de adicionar material para preenchimento deste espaço e, assim, realizar a união de forma adequada. Quando realizada a soldagem com adição de material, esta pode ser em forma de vareta ou arame em aplicações manuais ou mecanizadas.

Na aplicação manual, o operador efetua a soldagem depositando o material de adição em forma de vareta de maneira fracionada, apenas quando sente necessidade de preencher os espaços da junta. Devido ao controle manual de quantidade de material e tempo relativo à deposição do mesmo ser definidos pelo operador esta aplicação torna-se descontínua e de baixa produtividade, dependendo da habilidade do soldador. No modo de adição mecanizada, diferentemente da aplicação manual, o movimento de avanço do arame dá-se através de um sistema de tracionamento. Este sistema é previamente programado para suprir as condições desejadas de adição de arame durante a soldagem conforme os parâmetros inseridos.

Para a aplicação mecanizada tem-se um ganho em produtividade, evitando-se as paradas que o operador necessita realizar com relação à reposição de varetas e tratando-se de um dispositivo independente para realizar a alimentação de arame seu manuseio requer menor habilidade para conduzir a soldagem (CUNHA, 2007). Visualmente obtém-se melhor qualidade no cordão de solda por tratar-se de uma alimentação com velocidade de deposição de material contínua, ou seja, não há irregularidades como na deposição manual onde o material é depositado de forma discretizada. Devido ao fato de nesta aplicação o arame ser

tracionado por um sistema mecanizado, pode-se utilizar formas (de adicionar este material de adição) diferenciadas, como com dispositivo acoplado ou desacoplado à tocha de soldagem TIG por conta de sua independência.

Para o processo MIG/MAG tem-se o mesmo sistema de alimentação de arame comparado ao processo TIG. Neste contexto, com relação à aplicação mecanizada, vem-se desenvolvendo estudos a fim de amplificar a gama de utilização dos processos, desenvolvendo-se modos de alimentação de arame diferenciados em busca de novas características na soldagem. Introduce-se então a alimentação dinâmica de arame, onde na adição mecanizada utiliza-se uma nova variável referente à movimentação deste arame durante a soldagem. Na soldagem convencional no processo TIG (ou no MIG/MAG), o arame movimenta-se apenas em uma direção de forma uniforme, em contrapartida, na soldagem com alimentação dinâmica o arame é adicionado realizando uma oscilação para frente e para trás em determinada frequência.

O estudo dos processos com alimentação dinâmica do arame está em evidência nos últimos anos, a fim de suprir o mercado que a cada dia se torna mais exigente quanto à qualidade e produtividade. Alguns métodos já existentes e com grande influência na literatura pelo modo de realizar esta movimentação são o Cold Metal Transfer (CMT) e o TIP-TIG. O CMT consiste em um processo utilizado na soldagem MIG/MAG, tecnologia desenvolvida pela empresa FRONIUS, do qual realiza a introdução de arame frio com movimentação dinâmica do arame no processo (FRONIUS, 2018). O termo arame frio provém da característica de energia de soldagem média menor comparada ao MIG/MAG convencional, durante a oscilação o arco voltaico varia entre arco aberto, conforme o arame avança para a peça a ser soldada gerando o curto circuito, e sem a presença de arco quando o arame realiza o recuo. O TIP-TIG, fabricado pela empresa TIPTIGUSA é utilizado no processo TIG. Este consiste de um sistema para aplicação da alimentação dinâmica na movimentação do arame durante a adição de material na soldagem, simulando a adição feita por um operador, porém, de forma controlada e uniforme (TIPTIGUSA, 2018).

O desenvolvimento de novas tecnologias no setor de soldagem é crescente a cada dia, porém poucos trabalhos foram publicados com o uso desta técnica de oscilação. Seus benefícios são evidentes, porém ainda não se conhece as verdadeiras razões físicas dessas vantagens (PAES, 2015), tampouco há estudos na área industrial de fabricação, com a apresentação desta metodologia aplicada. Assim questões como custo de implementação não tornam a tecnologia utilizável como justificativa concreta. Desta forma, observa-se a

necessidade de pesquisa e desenvolvimentos nesta área que possibilitem explorar estes benefícios.

A fim de criar tecnologia própria para implementação da alimentação dinâmica do arame no processo TIG, elaborou-se um projeto para realização deste efeito utilizando um dispositivo compacto e de baixo custo. Desta maneira, buscou-se como meta a resposta ao movimento em amplitude e frequência semelhantes aos modelos que realizam esta técnica existente no mercado.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver e caracterizar um dispositivo para realizar a alimentação dinâmica do arame no sentido axial à poça de fusão no processo TIG.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um dispositivo que seja capaz de realizar a alimentação dinâmica do arame;
- Caracterizar o funcionamento do dispositivo com base nas propostas de desenvolvimento de realizar a oscilação do arame, possibilidade de ajustes de amplitude de até 10 mm e frequência de até 20 Hz;
- Realizar ensaios de soldagem com o objetivo de avaliar o comportamento do dispositivo durante o funcionamento;
- Avaliar os aspectos morfológicos dos cordões de solda produzidos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

De acordo com a American Welding Society (AWS) a soldagem é o processo de união de materiais usado para obter a coalescência localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição. Existe uma diversa gama de variáveis que influenciam nas características de uma junta soldada. Algumas dessas características são a temperatura inicial e aspectos dimensionais das chapas a serem soldadas, o coeficiente de troca térmica do material, a composição química do material destas chapas, o gás de proteção utilizado, o tipo de eletrodo e as variáveis de energia, o material de adição e a forma de deposição do mesmo (BRACARENSE, 2009).

Dentro da categoria relativa ao material de adição e as variáveis referentes à forma como este é adicionado durante a soldagem, existem questões de angulação em relação à superfície da peça de trabalho, posição em relação à tocha de soldagem, distância da poça de fusão e movimentação relativa do arame. Logo, a cada dia encontram-se novas tecnologias a fim de explorar resultados provindos da mudança destes aspectos e obter controle sobre as variáveis adicionadas a solda, buscando a constante melhoria dos processos de soldagem. Procura-se manter as características originais da soldagem TIG, porém, busca-se o aumento da gama de aplicações e diferenciação na operacionalidade do processo, tornando-o mais fácil de modo a exigir menor habilidade dos profissionais da área de soldagem (CUNHA, 2007).

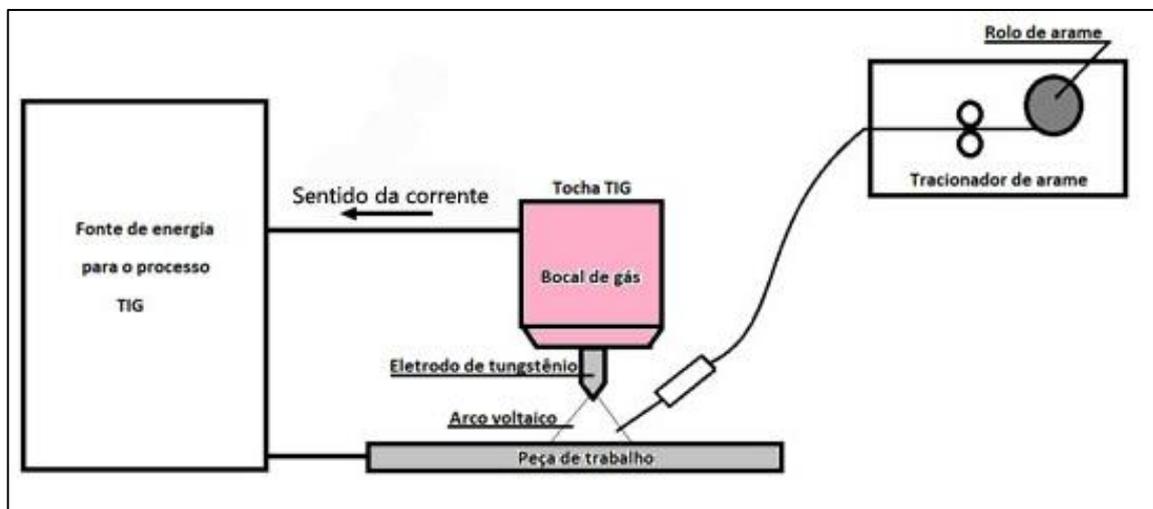
2.1 SOLDAGEM TIG

Patenteado em 1942 por Russel Meredith (1942), Tungstein inert gas (TIG), também conhecido como Gas Tungstein Arc Welding (GTAW), é um processo de soldagem que envolve a produção de um arco voltaico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio não consumível e a peça de trabalho. A poça de fusão (metal líquido) e o eletrodo são protegidos por um gás inerte, geralmente argônio, fornecido através de um bocal de gás presente no final da tocha de soldagem, na qual o eletrodo é posicionado concentricamente como mostrado na Figura 1. Este gás é ionizado através da passagem de corrente pelo eletrodo e, assim, sustenta o arco voltaico. Este arco voltaico é fonte a de energia térmica para realização da fusão dos materiais durante a soldagem. O processo TIG é amplamente conhecido pelas características

visuais do cordão de solda e elevado controle dos parâmetros do processo, do qual se relaciona como uma soldagem em constante evolução e pesquisa.

As principais vantagens do processo TIG incluem um arco estável com excelente controle das variáveis e do resultado da soldagem. Têm importantes aplicações na soldagem de aços inoxidáveis, metais leves como ligas de alumínio, magnésio e cobre, sendo adequado para soldar qualquer tipo de material soldável além de chumbo e zinco. Pode ser utilizado em todos os tipos de junta e posições de soldagem, no entanto, a soldagem TIG é mais adequada para materiais finos, 0,5 mm até 3 mm de espessura (WEMAN, 2013).

Figura 1- Representação esquemática do processo TIG convencional



Fonte: Autora (2018)

Por tratar-se de um processo onde o arco elétrico é sustentado pelo gás ionizado e o eletrodo não consumível, pode-se realizá-lo de forma autógena, sem adição de material, ou com adição de material. Com a soldagem autógena pode-se perceber a minimização do uso de recursos e matéria prima de adição, tornando o processo mais econômico tratando-se de custo. Geralmente é utilizado em soldagens de juntas sobrepostas, raízes sem abertura, juntas com ângulo exterior e espessuras finas, pois não pode haver falhas ou espaços que devam ser preenchidas por material externo. A maior vantagem para esta condição é a não dependência do material de adição, porém, muitas aplicações exigem esta adição de material por conta de variáveis que afloram desta característica (Olivares et al, 2015).

Quando se fala em soldagem com adição de material busca-se suprir a necessidade do aumento de produtividade devido à demanda cada dia maior. Quanto a isto a

automatização e mecanização têm sido utilizadas neste tipo de soldagem. Com isso novas técnicas de adição de material são exploradas.

2.1.1 Soldagem com alimentação de arame

A alimentação de arame no processo TIG é realizada normalmente diretamente na poça de fusão. Desta forma existe a possibilidade de variações para adicionar este material. A adição pode ser feita manualmente ou de forma mecanizada. Para a adição manual o material utilizado é em forma de varetas de modo a facilitar o manuseio do operador, porém, por ser finito e o operador não depositar de forma uniforme, torna como consequência um processo descontínuo. Para a adição automatizada o material utilizado é em forma de arame. Utilizando um tracionador mecanizado para realizar o avanço deste arame, com ou sem dispositivos de alimentação acoplados diretamente à tocha, o material é adicionado. O volume de material em forma de arame, disposto em rolos, é muito maior quando comparada as varetas, resultando em maior eficiência na utilização, pois não há necessidade de paradas de reposições com grande frequência quanto no processo de adição manual, este dispositivo mecanizado é mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Dispositivo de alimentação mecanizada de arame, acoplado (a) e não acoplado (b) a tocha de soldagem



Fonte: Silva (2016)

Com este tipo de equipamento é possível depositar cerca de 40% a mais de material quando comparado a adição por varetas, sem considerar o tempo de parada para as trocas (CUNHA, 2007). Relatos de Richardson (1995) indicam aumento de cerca de 800% na

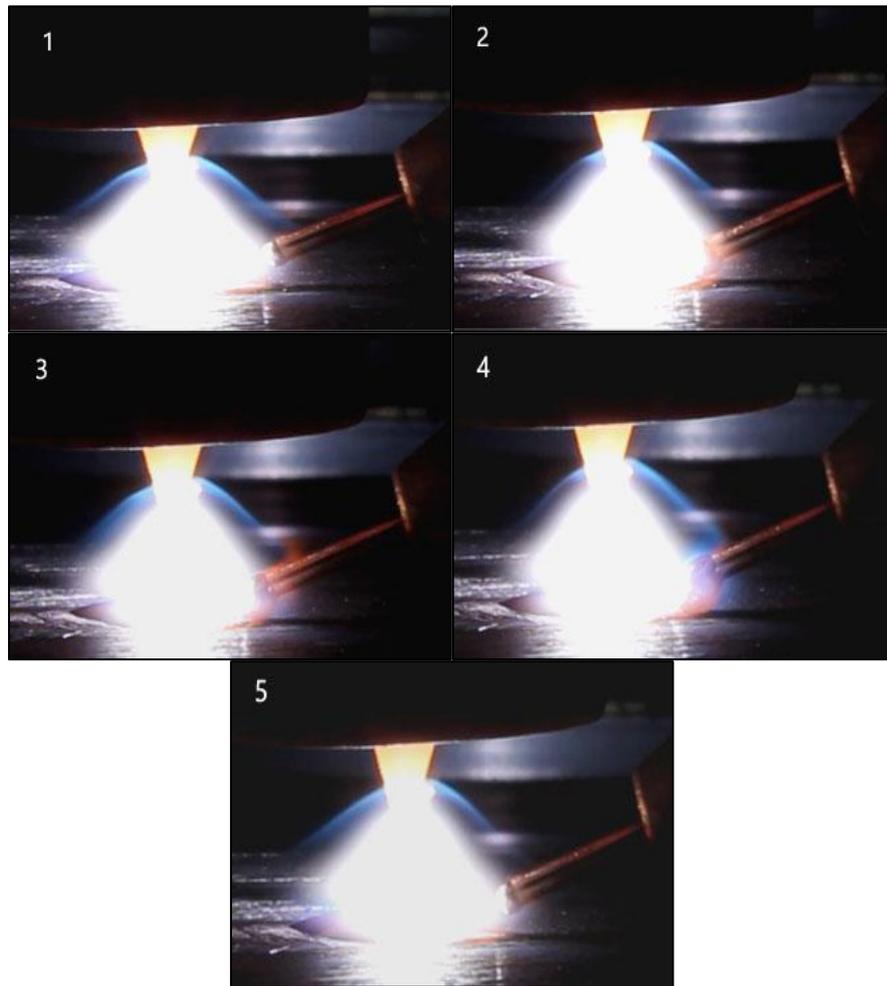
produtividade de cordões de solda com relação aos tempos de soldagem quando comparado à adição mecanizada a manual. Há aumento na gama de aplicações visto que se obtém melhora significativa no controle do processo bem como a simplificação da operação manual.

A alimentação de arame mecanizada no processo TIG, convencionalmente, é realizada de maneira contínua ou pulsada. Nestes tipos de alimentação o arame se movimenta apenas em uma direção com velocidades pré-definida pelo operador no momento da parametrização do sistema conforme a necessidade, ou seja, caso a alimentação seja contínua a parametrização realizada pelo operador para o sistema geralmente leva em consideração a energia de soldagem e a velocidade de avanço no processo. Caso haja alimentação pulsada, esta é utilizada quando a corrente de alimentação é pulsada (TIG pulsado). Para acompanhar a corrente de pulso, quando a energia é maior e funde de forma mais rápida o material, o arame movimenta-se de maneira mais rápida do que na corrente de base, onde a energia é mais baixa, causando uma queda na velocidade com o qual o material é fundido.

Para o processo convencional de alimentação de arame na soldagem TIG pode-se variar o modo de transferência metálica. Dois modos de transferência conhecidos são o modo intermitente e o modo em ponte. No modo intermitente as gotas formadas na ponta do arame são liberadas de forma sequencial de forma discretizada como mostrado na Figura 3. Para o modo em ponte há uma ligação contínua entre o arame e a poça de fusão por uma ponte metálica como mostrado na Figura 4. Caso o processo ajustado de modo a esta transferência em ponte não ser alcançada o material é depositado de forma intermitente na poça de fusão, com tamanhos de gotas irregulares. Existe então uma correlação entre parâmetros, juntamente a velocidade do arame contínua com a energia de soldagem na qual resulta num processo contínuo. Busca-se idealmente uma transferência metálica do tipo ponte (SILVA, 2016), para manter a continuidade e uniformidade na soldagem TIG comum.

Estes modos de transferência são dependentes de várias fontes, incluindo a posição de alimentação do arame e os parâmetros de energia que são utilizados (GODINHO, 2017), entre outros. Um exemplo da sensibilidade à mudança de parâmetros é citado por Pigozzo (2014), onde o mesmo relata a mudança de modo de transferência metálica de em ponte para intermitente apenas com uma alteração de $1,5^\circ$ no ângulo de inserção do arame.

Figura 3 - Sequência de imagens demonstrativas do modo intermitente de transferência metálica



Fonte: Autora (2018).

Figura 4 – Imagem demonstrativa do modo de transferência metálica em ponte



Fonte: Autora (2018).

Uma das principais características de um processo com oscilação do arame é a capacidade de obter controle no momento da transferência metálica, ou seja, para uma forma

de transferência em gotas, intermitente, utiliza-se a transferência por tensão superficial. Esta transferência ocorre quando uma gota se forma e esta encosta na poça de fusão sendo ‘puxada’. É possível com a imposição da frequência, por exemplo, para uma determinada corrente de soldagem, destacar esta gota de forma controlada, comandando o tempo no qual a gota toca à poça de fusão e a tensão superficial realizará o destacamento da mesma, criando assim, uma gama de aplicações e estudos ainda maiores para o processo.

2.2 ALIMENTAÇÃO DINÂMICA DO ARAME

Quando a alimentação de arame é realizada de forma dinâmica, o deslocamento de avanço do arame é caracterizado pela sobreposição de dois movimentos. Um movimento de avanço contínuo com velocidade constante associado a um movimento de alternância entre avanço e retorno do arame com frequência e amplitude controladas. Através da imposição destes dois movimentos obtêm-se a velocidade média de avanço igual à designada para a realização da soldagem.

Existem no mercado técnicas para impor alimentação dinâmica ao arame nos processos de soldagem, sendo as técnicas mais conhecidas o TIP-TIG e o Cold Metal Transfer (CMT). Apesar de serem utilizadas para processos distintos, TIP-TIG para o processo TIG e CMT para o processo MIG/MAG, as duas técnicas possuem tecnologia para realizar o efeito de oscilação de arame de adição que independem do tipo da soldagem realizada.

2.2.1 TIP-TIG

O processo TIP-TIG é uma variação do processo convencional com adição mecanizada de arame TIG. O metal de adição pode ser previamente aquecido (hot wire), o que melhora significativamente a taxa de deposição, cerca de 400 % (TIPTIGUSA, 2018), e alimentado de forma contínua com oscilação. Os equipamentos do qual utilizam oscilação mecânica de arame promovem melhora na dinâmica da poça de fusão, ajuda a melhorar a fluidez e a retirar as impurezas e os gases que possivelmente formam poros na junta soldada (PIKE, 2013). O equipamento é muito semelhante ao utilizado no processo TIG convencional, o que os diferencia está localizado no conjunto tracionador de arame, onde a oscilação é empregada.

Patenteado em 1999 pelo australiano Siegfried Plasch, o TIP-TIG utiliza a adição de calor no arame de adição através da passagem de corrente pelo mesmo, juntamente com a

uma oscilação adicional. Esta variação da soldagem TIG foi possível devido à movimentação por princípio mecânico no conjunto tracionador de arame (THE FABRICATOR, 2011) mostrada na Figura 5. Tratando-se de uma variação semiautomática do processo TIG convencional manual, existe a necessidade da alimentação de arame com amplitude máxima de oscilação dentro do arco voltaico. Caso o arame de adição oscile fora do arco, outro arco voltaico poderá se abrir devido à passagem de corrente pelo arame para aquecê-lo, no caso do TIP-TIG hot wire, necessitando de um sistema de controle, limitando a amplitude de oscilação do arame. Com objetivo de melhorias nos aspectos da soldagem do TIG convencional, algumas das melhoras que as empresas anunciam com a utilização deste tipo de equipamento são: a diminuição dos fumos; menor oxidação da solda; aumento de 200 a 300% na produtividade de cordões de solda; minimização de 400% nos gastos e redução de 30 a 60% do custo do gás (TIPTIGUSA, 2018). Além disso, pelo fato da automatização da alimentação do arame, as habilidades exigidas para o operador são menores.

Figura 5 – Cabeçote tracionador de TIP-TIG



Fonte: Pike (2013)

As tochas de soldagem TIP-TIG são especialmente desenvolvidas para realizar esta alimentação de arame, semelhante à alimentação mecanizada no processo normal, logo possuem um condúite para passagem de arame e um bico alimentador posicionado estrategicamente na ponta da tocha de soldagem (Figura 6) de modo a efetuar a adição de material com controle de ajuste em relação à angulação e altura, referentes à poça de fusão.

Figura 6 - Detalhes de uma tocha TIP-TIG



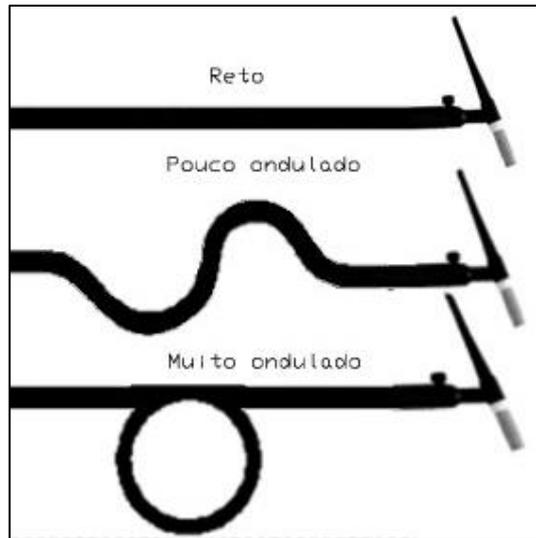
Fonte: TIPTIGUSA (2018).

O processo TIP-TIG é o que mais se assemelha em quesito estrutural as definições do projeto a ser realizado, porém o fato de utilizar da movimentação de todo o cabeçote tracionador de arame torna o dispositivo relativamente grande, produtor de vibrações e ruídos no sistema. Algumas das limitações deste processo são as características fixas referentes aos parâmetros de ajuste. É possível a utilização de uma amplitude fixa juntamente a variação da frequência de oscilação, esta que pode chegar até em torno de 20Hz (TIPTIGUSA, 2018), desta forma estudos da influência destas variações de parâmetros correlacionados no processo são limitados. Outra limitação importante é o fato do sistema ao qual realiza a oscilação encontrar-se no cabeçote tracionador de arame, tendo que ampliar esta movimentação através do mangote da tocha de soldagem TIP-TIG chegando ao bico direcionador do arame. Este fato faz com que o efeito elástico existente no decorrer do caminho do arame no mangote crie efeitos sobre a resposta final de oscilação, adicionando uma variável como comprimento e posicionamento do mangote como influência na oscilação do arame.

A força necessária para empurrar o arame é diretamente proporcional à força de atrito entre arame e conduíte. Esta força de atrito, por sua vez, depende do coeficiente de atrito entre o arame e conduíte e da disposição do mangote durante a soldagem (reto, ondulado ou muito ondulado), conforme mostrado na Figura 7. Quanto maior a ondulação do mangote maior o atrito e o efeito mola causado. Esta disposição resulta em uma determinada constante de mola K do sistema, gerando um efeito de mudança na movimentação do arame. Por conta disso, verifica-se a redução da velocidade de avanço em mudanças abruptas na direção de movimento do arame (ASHIDH, 2015). No caso da soldagem TIP-TIG este posicionamento de mangote poderá acarretar em uma dissipação da energia imposta pela oscilação de arame no sistema massa mola. Quando ocorre uma dissipação desta

movimentação o arame passa a não corresponder de forma fiel à movimentação imposta no cabeçote tracionador, logo, no bico direcionador o comportamento de oscilação será diferente com relação ao esperado.

Figura 7 - Esquemática dos possíveis posicionamentos do mangote da tocha



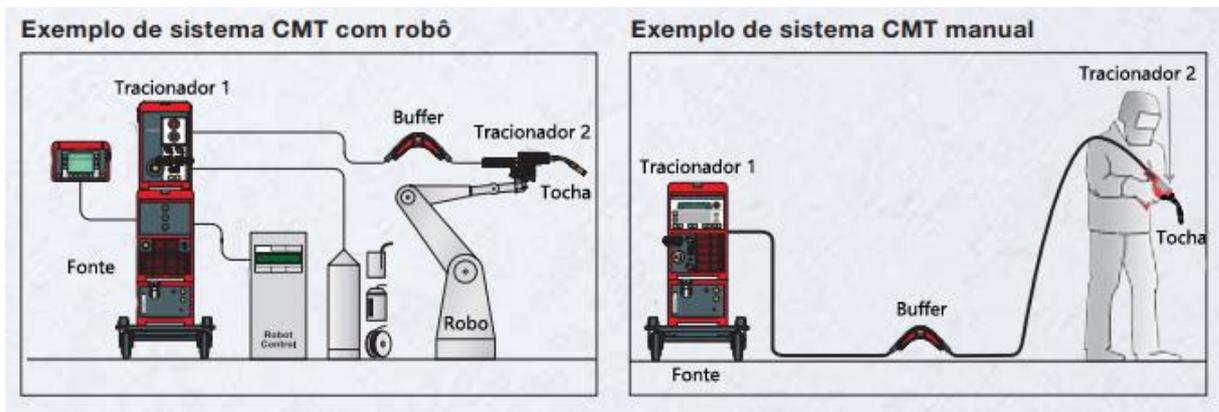
Fonte: Autora (2018)

2.2.2 Cold Metal Transfer (CMT)

O Cold Metal Transfer (CMT) consiste em um processo utilizado na soldagem MIG/MAG, tecnologia patenteada pela empresa FRONIUS 2004, que utiliza menores temperaturas na realização das soldagens por realizar a introdução da movimentação do arame na atuação do processo. O movimento de avanço e recuo do arame faz com que o arco elétrico seja sistematicamente descontinuado, ou seja, quando o arame avança a ponto de tocar a poça de fusão o arco voltaico é aberto e quando há o retorno do arame este arco se estingue resultando em uma alternância entre estados de quente e frio, dando origem ao nome do processo. O termo frio é relativo ao processo pela comparação ao aporte de calor na soldagem MIG/MAG convencional. Quando há curto circuito um sistema de reconhecimento é acionado atuando sobre a regulagem do processo, então através do recolhimento do arame há o destacamento da gota, de forma digitalmente comandada (FRONIUS, 2018). Existem materiais ou aplicações onde uma transmissão de calor baixa fornece vantagens, como por exemplo, maior facilidade no passe de raiz, soldagens sobre cabeça e a isenção de respingos.

O CMT realiza a movimentação dinâmica do arame através de dois tracionadores, um para realizar o movimento do arame para frente e para trás no decorrer da soldagem (localizado na tocha), que pode atuar até 90 vezes por segundo, e outro que empurra o arame em velocidade constante (localizado no cabeçote tracionador), existe então um buffer que isola o acionamento de arame dianteiro do traseiro, permitindo um transporte sem problemas (FRONIUS, 2018). Na Figura 8 tem-se a representação do sistema manual e robotizado do processo CMT.

Figura 8 - Exemplo de sistemas CMT



Fonte: Fronius (2018).

3 DESENVOLVIMENTO

SIGILO

SIGILLO

SIGILLO

SIGILLO

SIGILLO

SIGILO

4 CARACTERIZAÇÃO DO DISPOSITIVO

4.1 DETERMINAÇÃO DA CORRENTE NA BOBINA

Com o protótipo concebido efetuou-se o teste de verificação da corrente necessária para realizar a movimentação do dispositivo. Acoplando a bobina móvel do sistema ao conduto de alimentação de arame e mantendo os ímãs estáticos com um suporte de fixação, realizou-se a alimentação da bobina. Através da aplicação de corrente contínua na bobina, foi aumentando-se gradualmente seu valor procurando-se verificar a força (valor de corrente) necessária para movimentar a bobina juntamente ao conduto. Para isto montou-se uma bancada de testes com a finalidade de definir a corrente necessária que resulta em uma força

suficiente para movimentação do conjunto. Nesta bancada utilizou-se uma fonte de corrente constante, a placa de potência, a unidade de acionamento Arduíno e o dispositivo acoplado ao conduto com arame. A utilização de arame neste teste foi para simular a imposição de resistência ao movimento, procurando chegar o mais próximo de uma aplicação real.

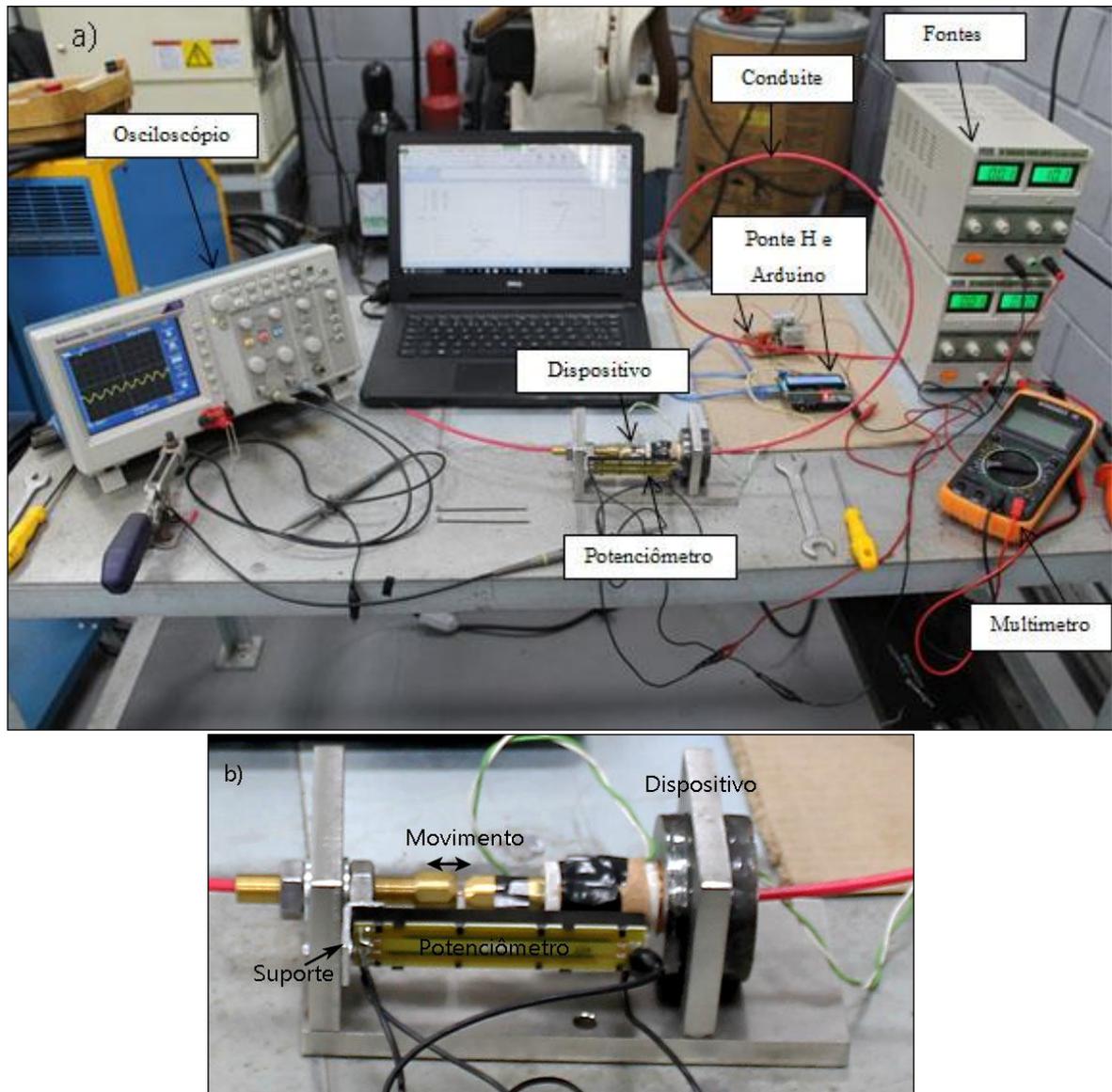
Quanto maior a corrente aplicada, maior a força imposta pelo sistema magnético, logo, o limite de corrente aceitável no sistema é a corrente máxima permitida pelo fio de cobre e também dos componentes da placa de potência de alimentação. Observou-se durante este ensaio a necessidade da utilização da corrente máxima admissível definida através do fio de cobre utilizado na construção da bobina, AWG29, do qual apresenta corrente máxima admissível de 2A (ELETROAQUILA, 2018).

4.2 ENSAIOS DE VERIFICAÇÃO EM BANCADA

4.2.1 Montagem do aparato

Após a definição da corrente de alimentação da bobina, puderam-se iniciar as etapas de caracterização do dispositivo. Primeiramente, realizou-se o ensaio de definição da função que descreve a movimentação do dispositivo variando no tempo. Para realizar a verificação da movimentação do dispositivo utilizou-se um potenciômetro linear, ao qual aplicado uma tensão de entrada, para cada posição estabelecida entrega como resposta uma devida tensão de saída. Deste modo, fixando este potenciômetro ao conjunto de forma alinhada, com o intuito de realizar seu movimento de forma acoplada e paralela ao dispositivo sem gerar resistências significativas (Figura 16b), pôde-se realizar o teste de calibração e verificação da função linearidade que descreve o movimento da bobina móvel. A bancada utilizada para realização desta etapa é ilustrada na Figura 16a. Composta pelo dispositivo desenvolvido, duas fontes de corrente constante, uma da qual acoplada à ponte H e placa arduíno e outra a o potenciômetro linear, um osciloscópio e um multímetros.

Figura 9 - Bancada de ensaios relativo ao funcionamento do dispositivo (a) e posicionamento do potenciômetro (b)



Fonte: Autora (2018)

Para este teste foi utilizado o arame estático na posição de passagem gerando certa resistência ao movimento. No dispositivo empregou-se a variação de amplitude listada na Tabela 1. O potenciômetro utilizado possui resistência $10\text{ K}\Omega$. A tensão de entrada no potenciômetro utilizada foi de 10 V . O multímetro foi utilizado para verificar a tensão resultante no potenciômetro durante os ensaios, cada posição utilizada está listada na Tabela 1 juntamente ao resultado de tensão lida no multímetro.

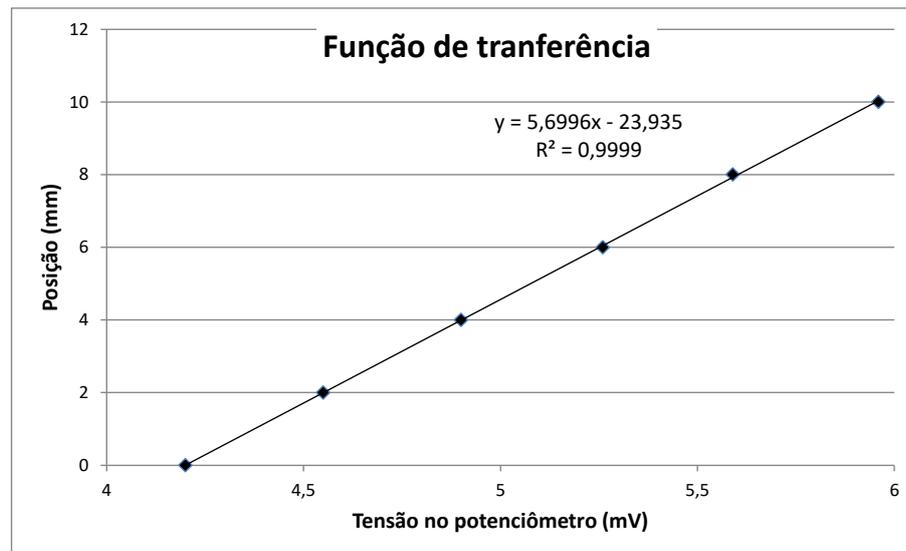
Tabela 1 - Relação posição x Tensão de saída no potenciômetro

Posição (mm)	Tensão de saída (V)
0	4,20
2	4,55
4	4,90
6	5,26
8	5,59
10	5,96

Fonte: Autora (2018)

Com esta tabela pôde-se gerar a função de transferência que correlaciona a tensão de saída no potenciômetro com a posição do dispositivo (amplitude de movimentação), obteve-se esta função através de uma interpolação linear entre os pontos mostrados no gráfico da Figura 17.

Figura 10 - Função de transferência utilizada para descrever a movimentação do dispositivo no tempo (Tensão x Posição)



Fonte: Autora (2018)

Logo para cada tensão no potenciômetro podemos relacionar a posição em amplitude no dispositivo. Com esta informação pode-se acompanhar o posicionamento durante o funcionamento através de um osciloscópio, lendo a tensão de saída no potenciômetro e utilizando a função de transferência encontrada.

4.2.2 Ensaios de verificação da amplitude e frequência de operação

Após a obtenção de uma função que descreve o comportamento do dispositivo durante sua operação, realizou-se ensaios para verificação dos parâmetros de amplitude e frequência. Neste ensaio teve-se por objetivo verificar o comportamento do dispositivo durante o seu funcionamento. Deste modo, estabeleceram-se diferentes amplitudes de oscilação (2, 4, 6, 8 e 10 mm) e para cada amplitude foi aumentando-se a frequência de oscilação partindo de 3 Hz em intervalos de 3 Hz até atingir a frequência limite de funcionamento, onde a amplitude não é mais atingida ou o comportamento deixa de ser o esperado durante a movimentação, os valores utilizados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores de amplitude e frequência utilizados nos ensaios de verificação da frequência limite e do comportamento

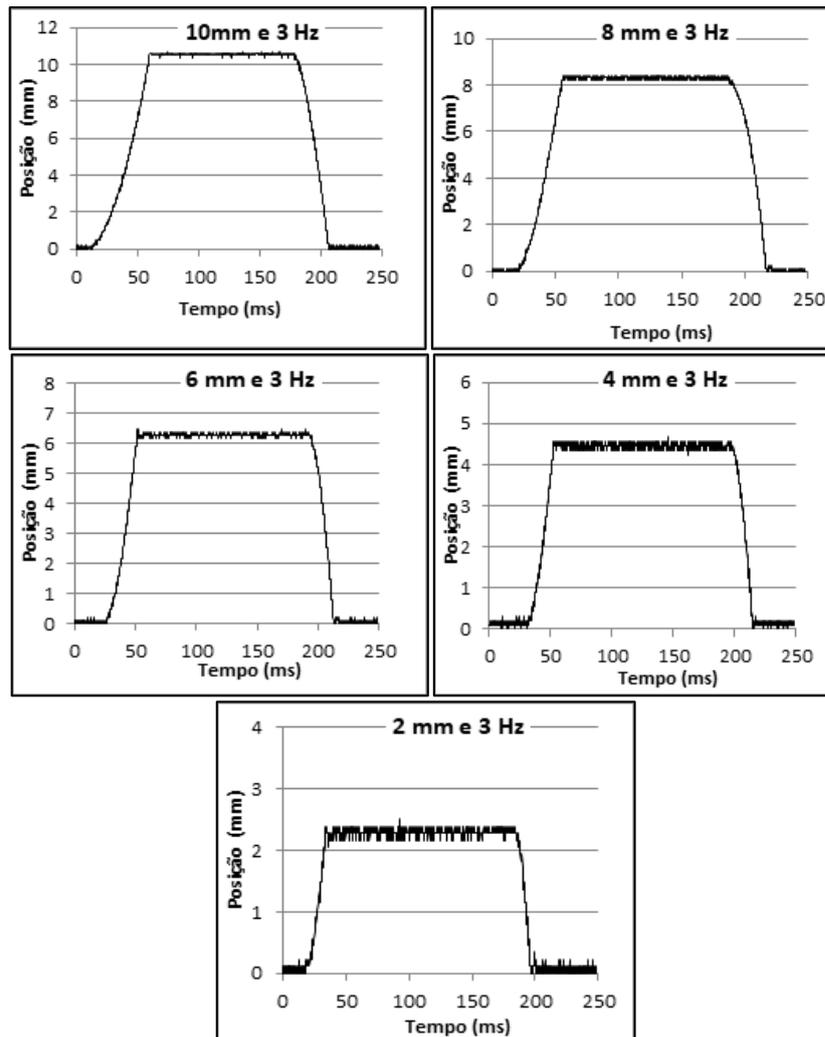
Amplitude (mm)	Frequências (Hz)
10	3, 6, 9, 10, 11, 12
8	3, 6, 9, 12, 14
6	3, 6, 9, 12, 15, 18, 20
4	3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24
2	3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 34

Fonte: Autora (2018).

A partir destes ensaios foram gerados os gráficos com os dados obtidos pelo osciloscópio (aplicando a função de transferência) e obtiveram-se as informações de amplitude do dispositivo. Para este ensaio utilizou-se uma tensão de alimentação fixa na bobina móvel de 8 V, que corresponde a aproximadamente 2 A de corrente.

Para cada amplitude, obteve-se um gráfico inicial detalhado para análise da dinâmica de resposta durante o avanço e retorno da bobina para a sua devida amplitude ajustada, todos para a mesma frequência de 3 Hz. Estes gráficos são mostrados na Figura 18.

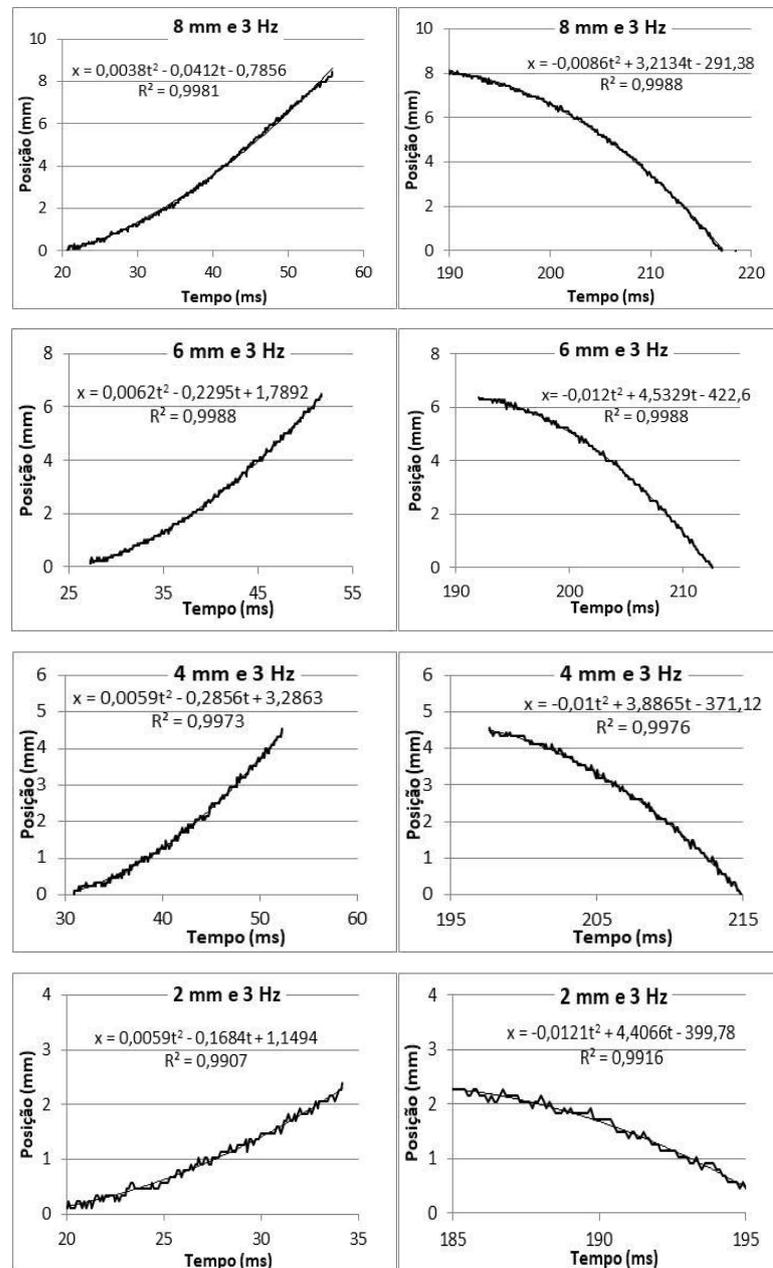
Figura 11 - Gráficos detalhados de posição para a mesma frequência de 3 Hz



Fonte: Autora (2018)

Filtrando as áreas de interesse, avanço e retorno, puderam-se gerar gráficos destes eventos e, assim, adicionar uma linha de tendência para a posição (mm), obtendo-se a equação característica da curva, os gráficos são mostrados na Figura 19.

Figura 12 - Gráficos que descrevem o movimento de avanço e retorno do dispositivo para diferentes amplitudes e frequência de 3 Hz



Fonte: Autora (2018)

A partir destas equações correspondentes às curvas encontradas, aplicando a primeira derivada nas obtém-se a função de velocidade, e derivando pela segunda vez a aceleração. Deste modo verifica-se a seguir as derivadas das equações na Tabela 3.

Tabela 3: Relação de equações derivadas das funções de posição variando no tempo do dispositivo (equações de velocidade e aceleração)

Amplitude (mm)	Função velocidade de avanço $v = \frac{dx}{dt}$ (mm/ms)	Função velocidade de retorno $v = \frac{dx}{dt}$ (mm/ms)	Função aceleração no avanço $a = \frac{dv}{dt}$ (mm/ms ²)	Função aceleração no retorno $a = \frac{dv}{dt}$ (mm/ms ²)
10	$0,00646t - 0,011$	$-0,0152t + 2,525$	0,0064	-0,0152
8	$0,0076t - 0,041$	$-0,0172t + 3,21$	0,0076	-0,0172
6	$0,0124t - 0,229$	$-0,024t + 4,53$	0,0124	-0,0240
4	$0,0118t - 0,28$	$-0,0201t + 3,88$	0,0118	-0,0201
2	$0,0118t - 0,168$	$-0,0242t + 4,406$	0,0118	-0,0242

Fonte: Autora (2018)

Através dos resultados pode-se visualizar que por tratar-se de funções de posição polinomiais de 2ª ordem para descrever o comportamento de avanço e retorno do dispositivo, a função velocidade a partir da posição nos retorna uma função de primeira ordem (equação da reta). A aceleração durante o percurso é constante como veremos a seguir a partir de uma análise com relação à Equação 1.

Como:

$$F = m.a$$

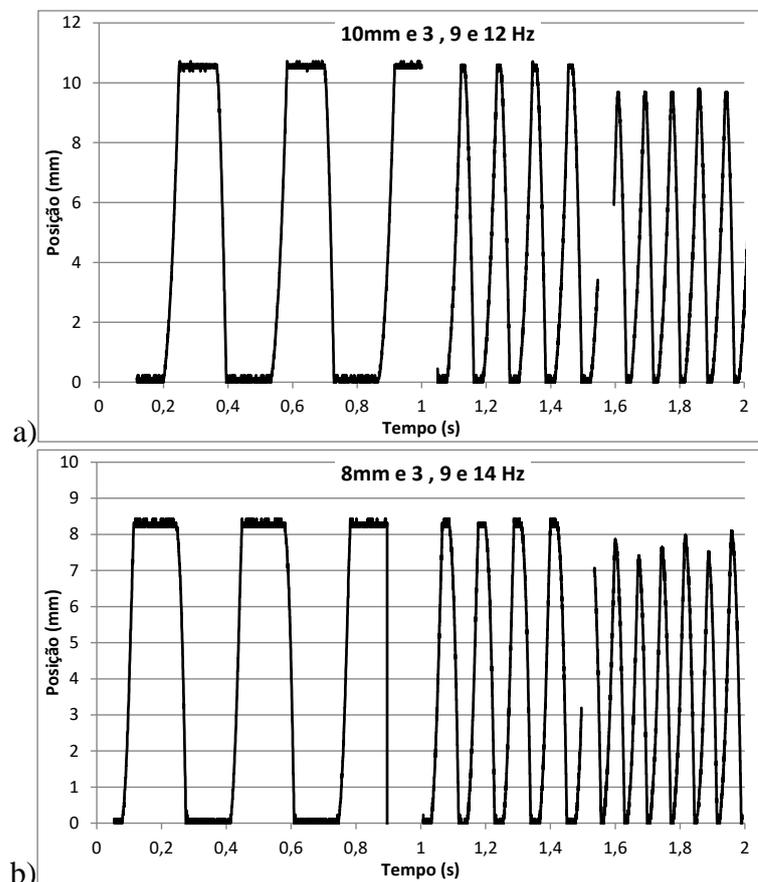
Eq 1

A massa do conjunto no dispositivo é constante, a corrente aplicada na bobina é fixa e o campo gerado pelo imã é fixo, logo os campos magnéticos gerados são fixos, e a força resultante depende da interação dos mesmos. Pela Equação 1 concluímos que a resposta em aceleração deveria ser a mesma independentemente da amplitude. Podem-se observar na Tabela 3 valores coerentes, porém, para algumas faixas há certa diferença na resposta em aceleração. Durante os ensaios constatou-se uma grande sensibilidade ao movimento provinda do dispositivo, por possuir uma baixa força resultante dos campos magnéticos. Qualquer pequena variação de fator de carga aplicada já se constatou influencia no comportamento do dispositivo. Uma destas observações foi com relação à posição do condúite na saída do dispositivo (acoplado a parte móvel, bobina), que ao gerar atrito entre o arame e a superfície do condúite tornavam resultados diferentes. Logo, a velocidade e a aceleração são fatores dependentes da carga, devido à característica construtiva do dispositivo. Pode-se observar que o retorno em módulo possui aceleração maior, pois durante a realização do ensaio foi utilizado o arame na posição de passagem dentro condúite, porém, este não foi fixado nas

extremidades. Durante o avanço a aceleração foi menor devido a maior resistência interna entre o condute e o arame, esta resistência foi maior devido ao comprimento de arame e condute utilizado serem maiores no sentido onde este foi acoplado a bobina móvel, do que no sentido a tocha de soldagem, por questões de posicionamento posterior.

Com intuito de verificar a frequência máxima de operação do dispositivo, foram realizados ensaios de variação de frequência para cada amplitude como descrito na Tabela 2. Aumentando gradativamente a frequência de operação para a mesma condição de amplitude e corrente. Para a amplitude de 10 mm e de 8 mm pode-se visualizar os gráficos na Figura 20, os demais resultados encontram-se no Apêndice A.

Figura 13 – Frequência limite para amplitude de a) 10 mm e b) 8 mm



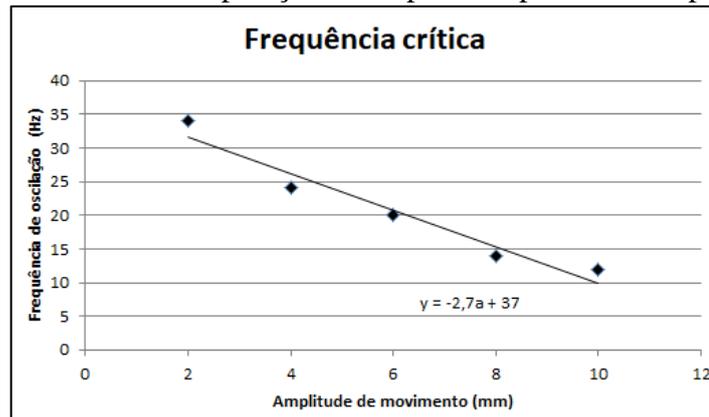
Fonte: Autora (2018)

Através deste ensaio onde se busca encontrar a frequência limite de operação do dispositivo para uma dada amplitude de funcionamento, encontrou-se dois principais comportamentos. Para as amplitudes de 10 mm e 4 mm, onde as frequências limites encontradas são respectivamente 12 e 24 Hz, o dispositivo não alcançou a amplitude selecionada funcionando de forma parcialmente correta. A frequência de oscilação passou a ser muito alta a ponto de não haver tempo suficiente para o dispositivo chegar ao fim de curso antes de retornar a posição inicial, tornando a resposta em amplitude menor e com tempos de pico e base muito pequenos referentes à mudança de sentido de movimentação do dispositivo.

Para as amplitudes de 8, 6 e 2 mm, onde respectivamente suas frequências limites, foram 14, 18 e 34 Hz, o comportamento foi um pouco diferente. Na frequência limite além do fato do dispositivo não alcançar o fim de curso antes do retorno ainda obteve-se uma mudança de comportamento tornando o movimento resultante instável para estas amplitudes.

A partir dos dados de frequência limite de operação foi possível então gerar a curva de frequência limite pela amplitude de movimento, ilustrada na Figura 21.

Figura 14: Frequência limite de operação do dispositivo para cada amplitude de operação



Fonte: Autora (2018).

Deste modo, interpolando os dados é possível estabelecer, para cada amplitude, a frequência limite de operação do dispositivo, e com este resultado obteve-se a Equação 2. Assim para qualquer amplitude de operação, a frequência máxima a qual o dispositivo é capaz de operar é definida pela seguinte equação:

$$F(\text{Hz}) = -2,7a + 37 \quad \text{Eq 2}$$

Onde **F** é a frequência limite de operação e **a** a amplitude em mm.

4.3 FILMAGEM COM CÂMERA DE ALTA VELOCIDADE

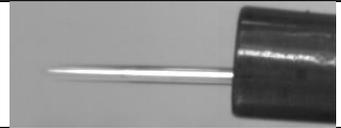
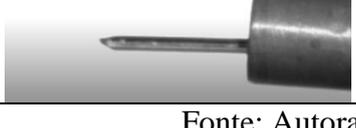
Utilizando uma câmera Photron Fastcam SA4, modelo 500K-M2, para filmagens de alta velocidade, efetuou-se ensaios de caracterização através de imagens do dispositivo e sua respectiva resposta imposta ao arame.

4.3.1 Ensaios de verificação da taxa de amostragem

Inicialmente realizaram-se ensaios para verificar a taxa mínima de amostragem suficiente para realização dos ensaios de caracterização. Utilizando uma amplitude de 5 mm e frequência de 20 hz (frequência máxima de operação definida para o dispositivo), com o

arame na posição de passagem estático, realizou-se ensaios de estudo para identificação da taxa de amostragem. Nestes ensaios foram empregadas taxas de amostragem de 60, 120, 250, 500 e 2000 fps. As taxas de amostragem escolhidas para os ensaios seguem as opções disponíveis na câmera utilizada. Na Tabela 4 é possível visualizar as imagens correspondentes às filmagens para cada taxa de amostragem.

Tabela 4 - Imagens obtidas para cada taxa de amostragem

Fps	Imagens obtidas durante o movimento do dispositivo	
	Movimento de avanço	Movimento de retorno
60		
120		
250		
500		
2000		

Fonte: Autora (2018)

Através das imagens obtidas foi constatado que a partir de 500 frames por segundo as imagens já são de uma qualidade suficiente para coleta de dados e informações.

4.3.2 Filmagem com dispositivo em movimento e arame estático

Após a verificação da taxa de amostragem necessária para realização das filmagens em alta velocidade, iniciaram-se as etapas de caracterização do comportamento do dispositivo e do arame durante seu funcionamento através das filmagens. Para este ensaio utilizou-se o dispositivo realizando o movimento de oscilação e o arame estático na posição de passagem gerando uma resistência ao movimento. Para uma mesma amplitude de 5 mm e com o arame estático realizou-se os ensaios de filmagem, os valores de frequências de oscilação utilizados no ensaio são listados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores de amplitude e frequência utilizados nos ensaios de verificação do comportamento do dispositivo com o arame estático na posição de passagem

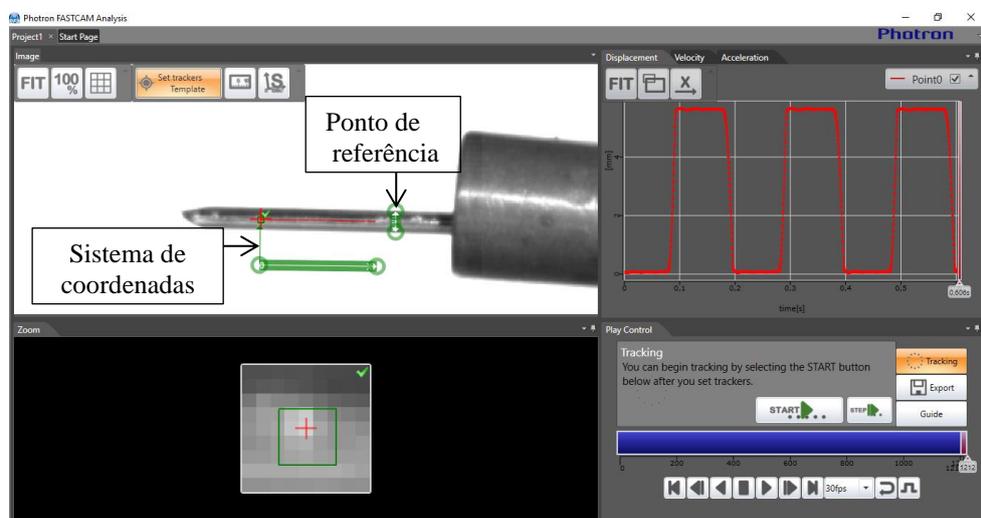
Amplitude (mm)	Frequência (Hz)
5	5
	10
	15
	20

Fonte: Autora (2018)

Relativo a estes ensaios, utilizou-se uma taxa de amostragem de 2000 frames por segundo para todos os testes. Através da utilização de softwares próprios da Photron, que são: Photron Fastcam Viewer (PFV) para tratamento de imagem, com opções de edição de qualidade de imagem, e Photron Fastcam Analysis (PFA) para tratamento de dados referentes ao vídeo, então se pôde extrair informações das filmagens.

O software PFA é referente à utilização de filmagens com análise de movimentação. Adicionando um arquivo de filmagem da câmera pode-se gerar uma escala, posicionar um sistema de coordenadas (estáticas ou dinâmicas), obter posicionamento de um ponto de referência em movimento entre outras funções. Através da inserção de um ponto de referência e um sistema de coordenadas é possível obter informações do movimento relativo ao objeto na filmagem. O software então gera pontos que indicam a posição da referência com relação ao sistema de coordenadas, sendo assim possível à criação de gráficos que indicam a posição do ponto de referência variando no tempo. Na Figura 22 pode-se observar a interface deste programa.

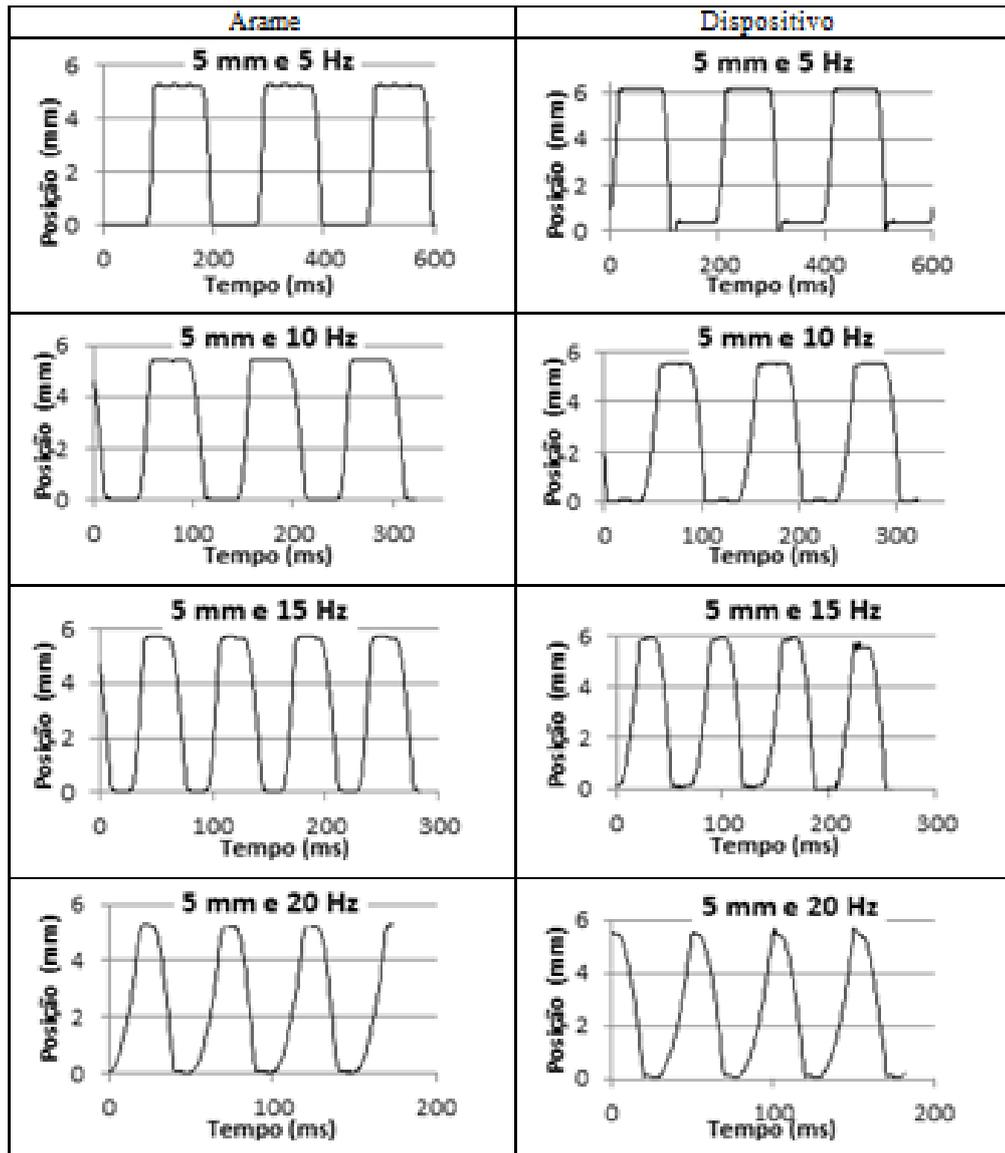
Figura 15 - Interface do programa Photron Fastcam Analysis



Fonte: Photron Fastcam Analysis (2018)

Através da utilização deste software, com relação às filmagens em câmera de alta velocidade para os ensaios referentes à Tabela 6 obtiveram-se os gráficos disponíveis na Figura 23.

Figura 16 - Gráficos referentes ao ensaio de verificação da amplitude para o arame e para o dispositivo (arame estático).



Fonte: Autora (2018)

Verifica-se inicialmente como resultado que conforme há um aumento da frequência de operação a forma de onda resultante passa a ser distorcida com relação à onda quadrada imposta ao sistema. O efeito de distorção é correlacionado a influência da velocidade de avanço e retorno do dispositivo, quanto maior estas velocidades, menor o tempo disponível

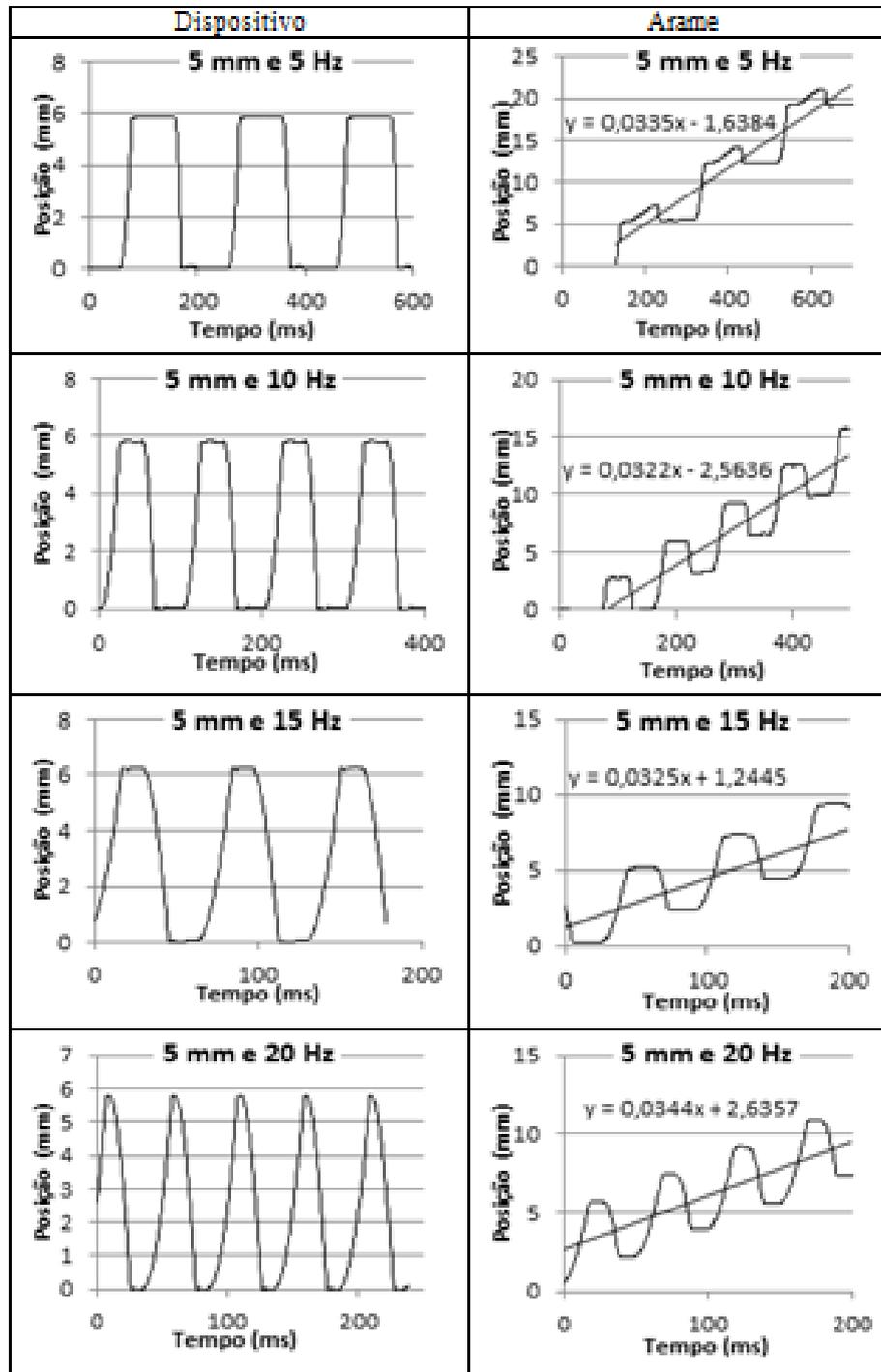
para realização do movimento. Pode-se correlacionar os resultados obtidos com as filmagens com os resultados obtidos através do ensaio em bancada com a utilização do potenciômetro linear, comprovando o comportamento do dispositivo. Com esta correlação pode-se também verificar que o arame reproduz fielmente a movimentação do dispositivo apesar de não haver engaste físico entre o arame e o conduíte. Verificou-se também um ‘ruído’ maior nos gráficos do dispositivo. Este ‘ruído’ é consequência do impacto gerado entre os componentes no momento da troca de sentido de movimentação, pois o movimento tanto de avanço quanto de retorno é descontinuado por batentes. No momento do impacto uma vibração se propaga na bobina móvel, porém este efeito não se propaga para o arame.

Pode-se observar que a frequência para os gráficos tanto para o dispositivo quando para o arame são iguais, o que muda é o tempo de avanço e recuo e o tempo de permanência na posição de final ou inicial. Com relação à resposta dinâmica verificou-se que para o dispositivo as inclinações nos gráficos com relação ao avanço e recuo são mais acentuadas, isso mostra que o dispositivo atua mais rapidamente que a resposta no arame. Isto é compreensível tendo em vista que o arame não está engastado ao dispositivo, logo sua resposta depende do coeficiente de atrito entre o arame e o conduíte. No entanto, esta diferença é pouco significativa na resposta final.

4.3.3 Filmagem com dispositivo em movimento e arame com velocidade constante de avanço

Efetuaram-se também ensaios com o arame sendo alimentado pelo tracionador (em movimento com velocidade constante de 2 m/min). Selecionou-se esta velocidade, pois é tipicamente utilizada para operações de soldagem a arco no processo TIG com alimentação de arame. Verificou-se o comportamento do dispositivo e do arame com relação a esta imposição. Logo se pode verificar a resposta em movimento para o dispositivo e para o arame na Figura 24.

Figura 17 - Gráficos referentes ao ensaio de amplitude para o arame e para o dispositivo (arame sendo tracionado com 2 m/min).



Fonte: Autora (2018)

Verificou-se que o comportamento é semelhante para todas as faixas de frequências analisadas. Houve uma diferença no valor de amplitude real com aquele lido pelo programa. Esta diferença acontece por questões de ajuste de escala na imagem e pela própria leitura no

software, pois podem ocorrer pequenas flutuações com relação à posição do ponto de referência posicionado na imagem durante o processo de leitura que o software realiza. Com relação a forma de onda, o dispositivo continua obtendo boa performance com relação a amplitude e dinâmica do movimento para frequências baixas, para maiores frequências aproximando-se da frequência limite, inicia-se a distorção da forma de onda. Com relação à resposta imposta ao arame pode-se observar que, de fato, quando o arame está em movimento este não afeta o desempenho do dispositivo de maneira geral. Além disso, com relação a seu comportamento, observa-se que a velocidade constante não é afetada pela oscilação assim obtemos a sobreposição de duas movimentações. Através da utilização da linha tendência linear, possibilitando a visualização do comportamento médio, pode-se obter as equações referentes a cada frequência para o arame. Verificando a função média de posição para o movimento do arame têm-se as seguintes equações listadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Verificação da velocidade para o arame em movimento

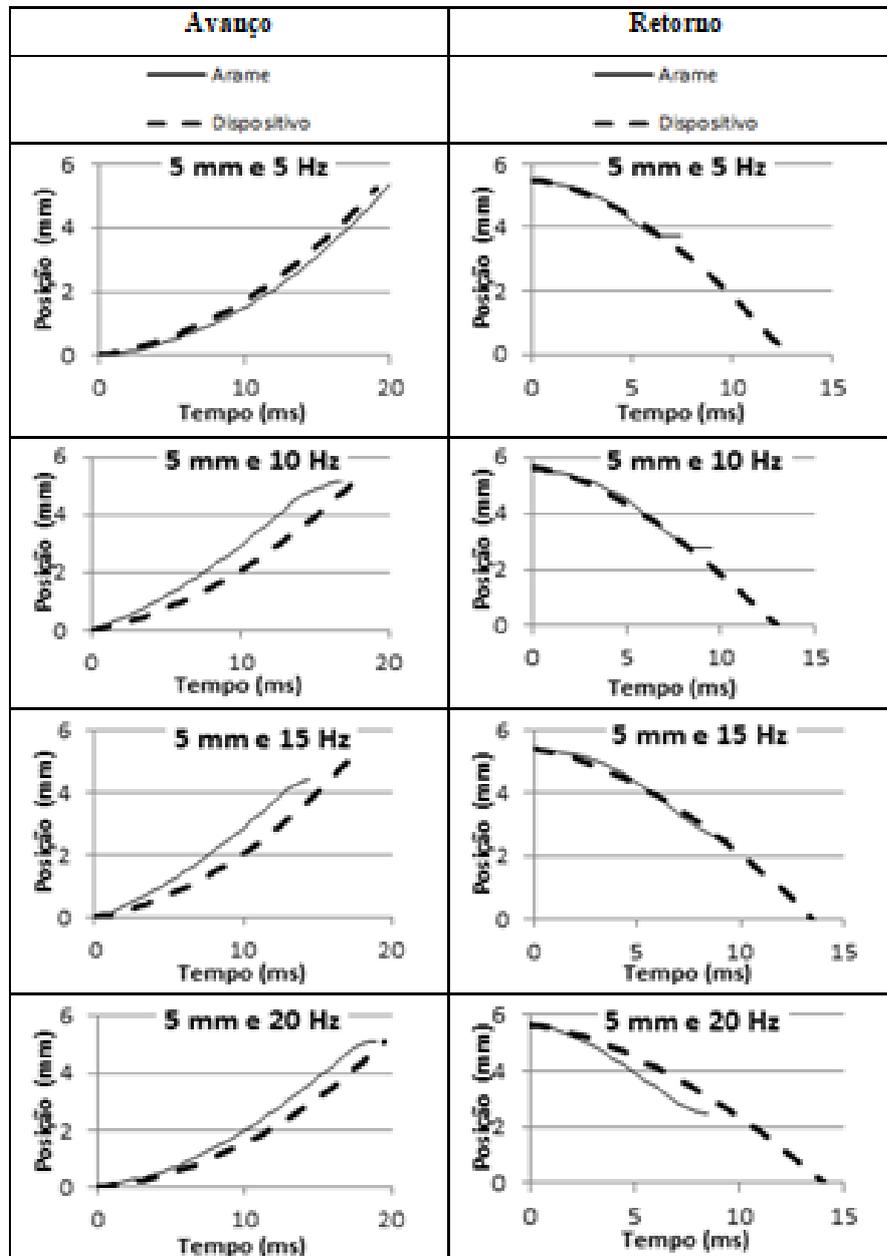
Frequência (Hz)	Equação do movimento (mm)	Velocidade (mm/ms)
5	$0,0335x - 1,6384$	0,0335
10	$0,0322x - 2,5636$	0,0322
15	$0,0325x + 1,2445$	0,0325
20	$0,0344x + 2,6357$	0,0344
		Média = 0,03315

Fonte: Autora (2018)

Através da obtenção das equações médias do movimento pode-se, a partir de suas derivadas, encontrar a velocidade média. Para o arame em movimento podemos observar a sobreposição de movimentos impostos ao mesmo, pelo gráfico, como base uma velocidade constante de 2 m/min imposta pelo tracionador de arame sobreposta a mais uma oscilação com frequência definida imposta pelo dispositivo. A média da velocidade de avanço resultou em 0,03315 mm/ms que convertendo para m/min fica 1,989 m/min que é a velocidade de avanço constante imposta pelo tracionador de arame evidenciando a sobreposição de movimentos.

Através dos gráficos de posição com o arame em movimento, tanto para o dispositivo quanto para o arame, realizou-se um ensaio de resposta dinâmica comparando os resultados entre eles, estes gráficos estão disponíveis na Figura 25.

Figura 18 - Gráficos de avanço e retorno do dispositivo e do arame (arame sendo tracionado com 2 m/min).



Fonte: Autora (2018)

Observa-se que com relação ao movimento de retorno do dispositivo e do arame a sincronização é bem evidente, parâmetros de velocidade e aceleração são os mesmos. Com relação à amplitude onde que para o dispositivo varia-se a amplitude ajustada de cerca de 5 mm, para o arame temos a sobreposição de amplitude de 5 mm mais a distância percorrida pelo arame devido a movimentação imposta pelo tracionador de 2 m/min no avanço. No movimento de retorno enquanto o arame retorna os 5 mm impostos pelo dispositivo ele

continua avançando a mesma distância descrita anteriormente imposta pelo tracionador, deste modo, a amplitude de retorno para o arame fica menor. Para o movimento de avanço, em contrapartida, para baixas frequências a movimentação é bem sincronizada, cerca de 0,5 ms de diferença, porém, quando é aumentada a frequência existe um aumento desta diferença para aproximadamente 2 ms, esta diferença não impacta significativamente na resposta final. Para frequências maiores o arame avança na frente do dispositivo. Este efeito ocorre quando se efetua o movimento de recuo do arame este recebe uma carga da qual impõe um efeito mola sobre ele. Quando existe a inversão de sentido de movimentação de recuo para avanço o arame libera sua carga como uma mola retornando a posição inicial. Esta sobreposição de efeitos (devido ao efeito mola imposto ao arame somado ao avanço imposto pelo dispositivo e pelo tracionador) causa uma diferença entre a movimentação do arame e do dispositivo, tornando o arame mais rápido no movimento de avanço.

5 ENSAIOS DE SOLDAGEM

Com o intuito de avaliar o comportamento do dispositivo durante a realização de uma soldagem real, efetuaram-se ensaios de soldagem. Para realização destes ensaios efetuou-se primeiramente a montagem de uma bancada constituindo os equipamentos necessários. Efetuaram-se as soldagens e logo após avaliou-se os resultados. Através de ensaios preliminares obtiveram-se os valores utilizados durante esta etapa do projeto.

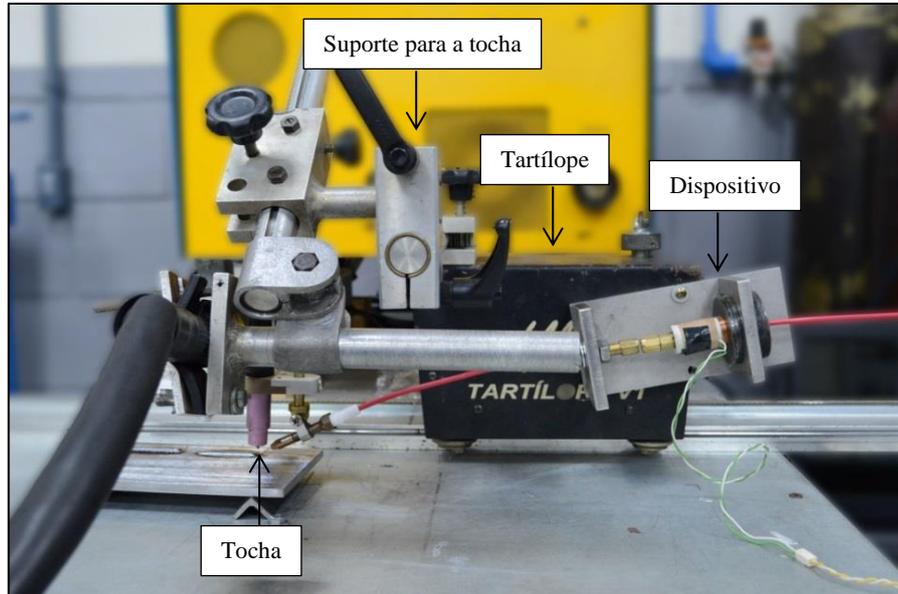
5.1 BANCADA DE ENSAIOS DE SOLDAGEM

5.1.1 Materiais e métodos

Tendo por objetivo a realização dos ensaios de soldagem utilizou-se uma bancada composta por uma fonte de soldagem modelo DigiPLUS A7-450. A fonte foi ajustada para operar com uma corrente de soldagem de 150 A (corrente medida 159 A). Para a alimentação do arame foi utilizado um cabeçote tracionador de arame modelo STA20-2. O arame utilizado conduzido à tocha através de um conduíte, passando pelo dispositivo de oscilação projetado. Para o deslocamento da tocha de soldagem utilizou-se o Tartilope V1 com uma velocidade de.

20 cm/min. Configurou-se o dispositivo para uma amplitude de 5 mm fixa para os ensaios. Estes detalhes podem ser observados na Figura 26.

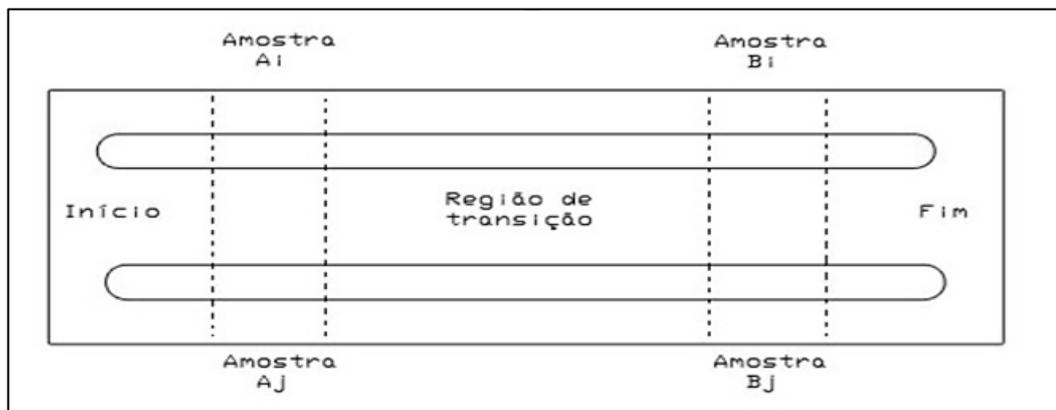
Figura 19 - Posicionamento do dispositivo e da tocha no tartilope V1 para realização dos ensaios de soldagem



Fonte: Autora (2018)

Para realização das soldagens utilizou-se corpos de prova de aço SAE 1020, com dimensões de 180 mm x 100 mm x 6,35mm de espessura. Para cada condição realizou-se dois ensaios, com e sem a utilização do dispositivo de oscilação. As amostras foram retiradas conforme esquematização na Figura 27.

Figura 20 - Esquema para retirada de amostras dos corpos de prova para análise macrográfica

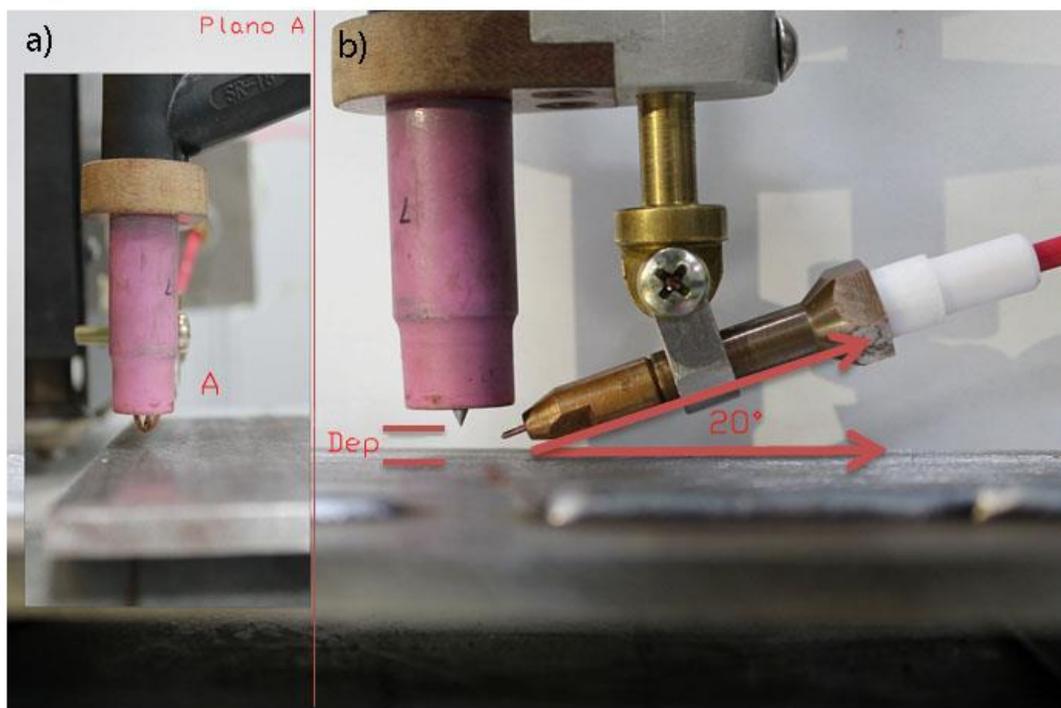


Fonte: Autora (2018)

Conforme mostrado na figura as amostras Ai e Aj são referentes aos ensaios sem oscilação do arame e as amostras Bi e Bj são referentes aos ensaios com oscilação

O gás utilizado para a soldagem foi o argônio puro com uma vazão de gás de 10 l/min. Para a alimentação de arame de forma precisa na poça de fusão utilizou-se dispositivo de alimentação acoplado a tocha, como mostrado na Figura 28. Utilizou-se um eletrodo de tungstênio com 2% de óxido de tório, de 2,4 mm de diâmetro, afiado em 30 graus, juntamente a um bocal de gás número 7. A tocha foi posicionada na posição vertical, a alimentação de arame realizada em 20 graus com relação a horizontal, a distância eletrodo peça (DEP) de 4 mm (Figura 28).

Figura 21 - Posicionamento da tocha e bico alimentador de arame, vista lateral (a) e frontal (b)



Fonte: Autora (2018)

Durante a realização dos ensaios de soldagem buscou-se avaliar a transferência metálica convencional, com o arame avançando de forma contínua, confrontando-a com a utilização da oscilação do arame. Para realização deste ensaio montou-se a Tabela 7 de experimentos que contém os valores ajustados e medidos durante a realização da soldagem.

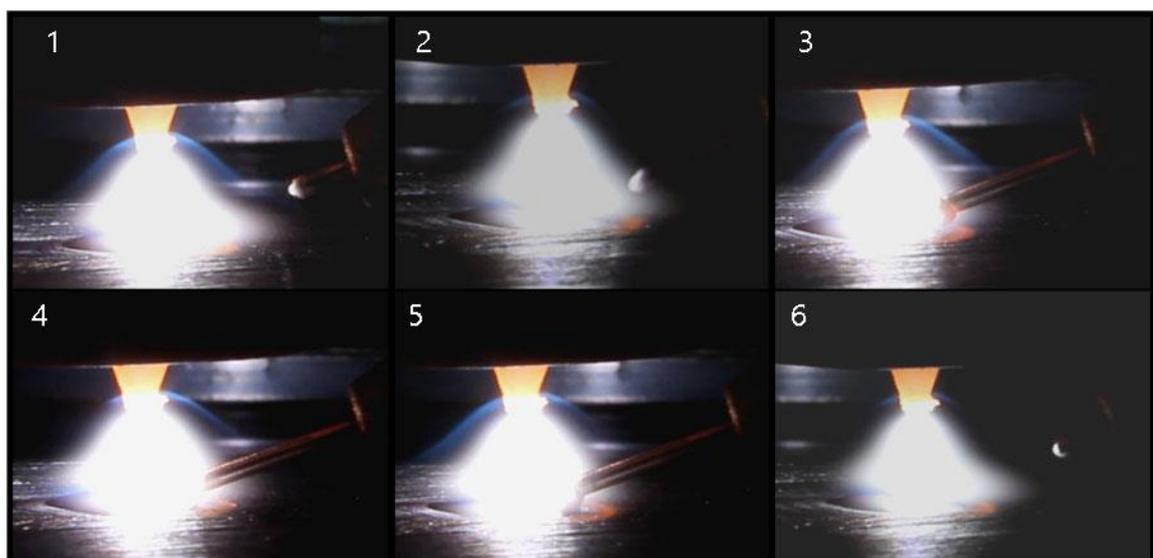
Tabela 7- Valores de velocidade de arame e frequência utilizados nos ensaios de soldagem, variando a velocidade do arame

Velocidade de arame ajustada (m/min)	Velocidade de arame medida (m/min)	Frequência de oscilação (Hz)
1	0,9	20
1,5	1,3	
2	1,9	
2,5	2,4	
3	2,9	

Fonte: Autora (2018)

Para o caso de maior criticidade avaliado, onde a velocidade do arame é muito baixa (1 m/min ajustado), o tempo para formação das gotas na ponta do arame é maior, ou seja, possibilita a formação de gotas maiores onde a transferência é feita de forma intermitente. Neste caso a oscilação do arame promove um controle na velocidade deposição das gotas, isto é, afeta o tamanho com que essas gotas serão depositadas (se a frequência de oscilação for maior as gotas depositadas serão menores e se a frequência for menor as gotas serão maiores). Isto, tendo em vista que com a alimentação dinâmica do arame a deposição da gota formada à poça de fusão é dada pela movimentação do arame que toca na poça e transfere esta gota pela tensão superficial, ou seja, há um controle da deposição desta gota, e variando-se a frequência pode-se variar o tamanho da mesma, este efeito está ilustrado na Figura 29.

Figura 22 – Sequencia de imagem ilustrativa da transferência metálica através da oscilação do arame



Fonte: Autora (2018)

Para avaliar os efeitos descritos anteriormente efetuaram-se ensaios de soldagem onde se utilizou a velocidade de avanço de arame crítica presente na Tabela 7, e a partir deste resultado para a mesma amplitude variou-se a frequência de oscilação do arame conforme a Tabela 8.

Tabela 8 - Valores de velocidade de arame e frequência de oscilação do arame utilizado nos ensaios de soldagem

Velocidade de avanço do arame medida(m/min)	Frequência de oscilação dinâmica do arame (Hz)
0,9	15
	10
	5
	1

Fonte: Autora (2018)

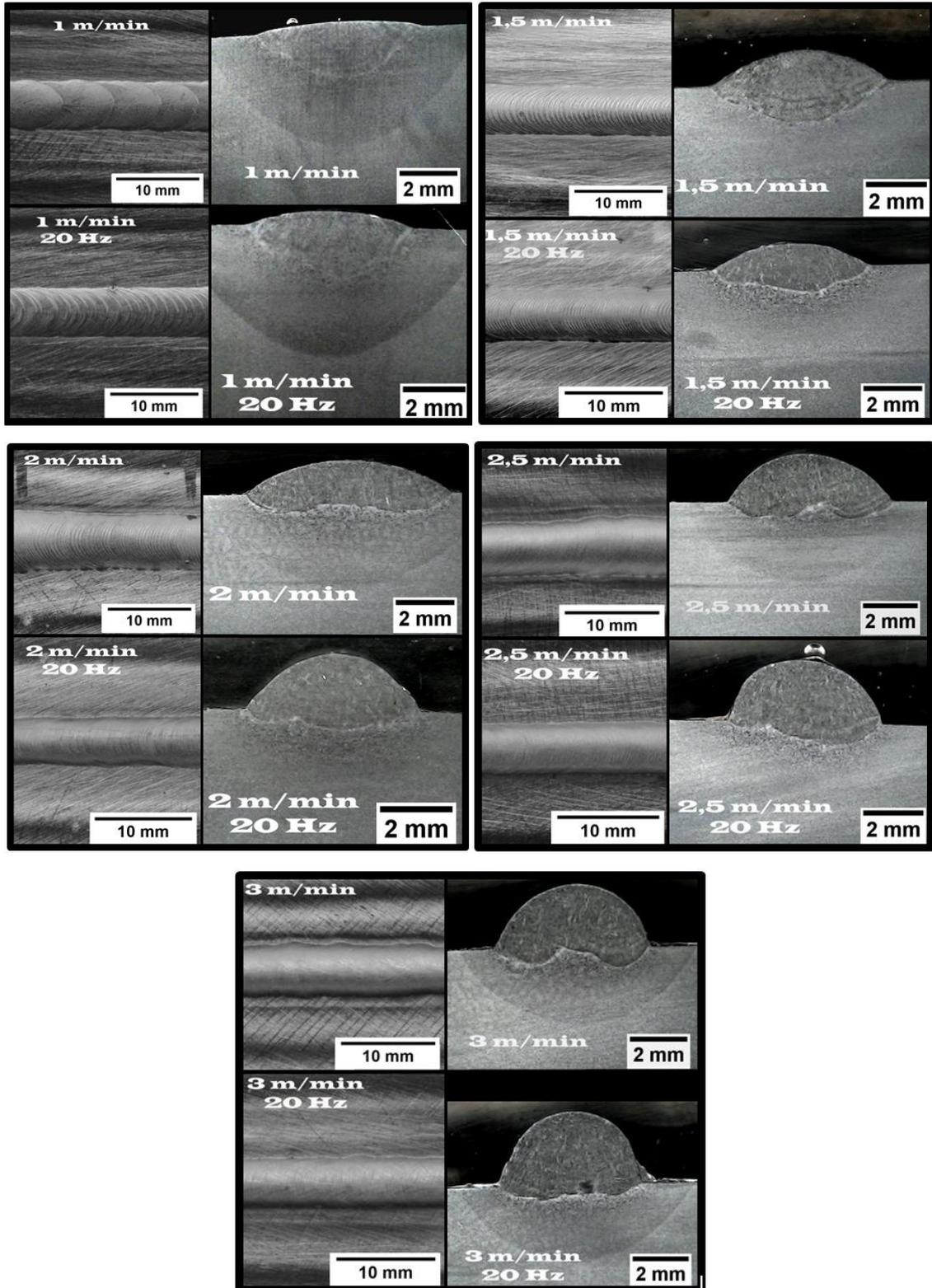
A fim de analisar os aspectos macrográficos da soldagem foi então realizada a preparação das amostras e retirada imagens a serem analisadas. As amostras foram inicialmente cortadas nas regiões de interesse como esquematizado na Figura 27, estes cortes foram realizados com uma policorte com refrigeração, deste modo o calor produzido pelo disco de corte não afetaria os resultados a serem analisados. Após realizar os cortes iniciaram-se as etapas de lixamento em diferentes mesh. Foram utilizadas lixas 180, 240, 400 e 600 de mesh. Para visualização do cordão efetuou-se o ataque químico com o ácido Nital 2% durante cerca de 15 segundos pelo método de imersão.

5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SOLDAGEM

5.2.1 Ensaio variando a velocidade do arame

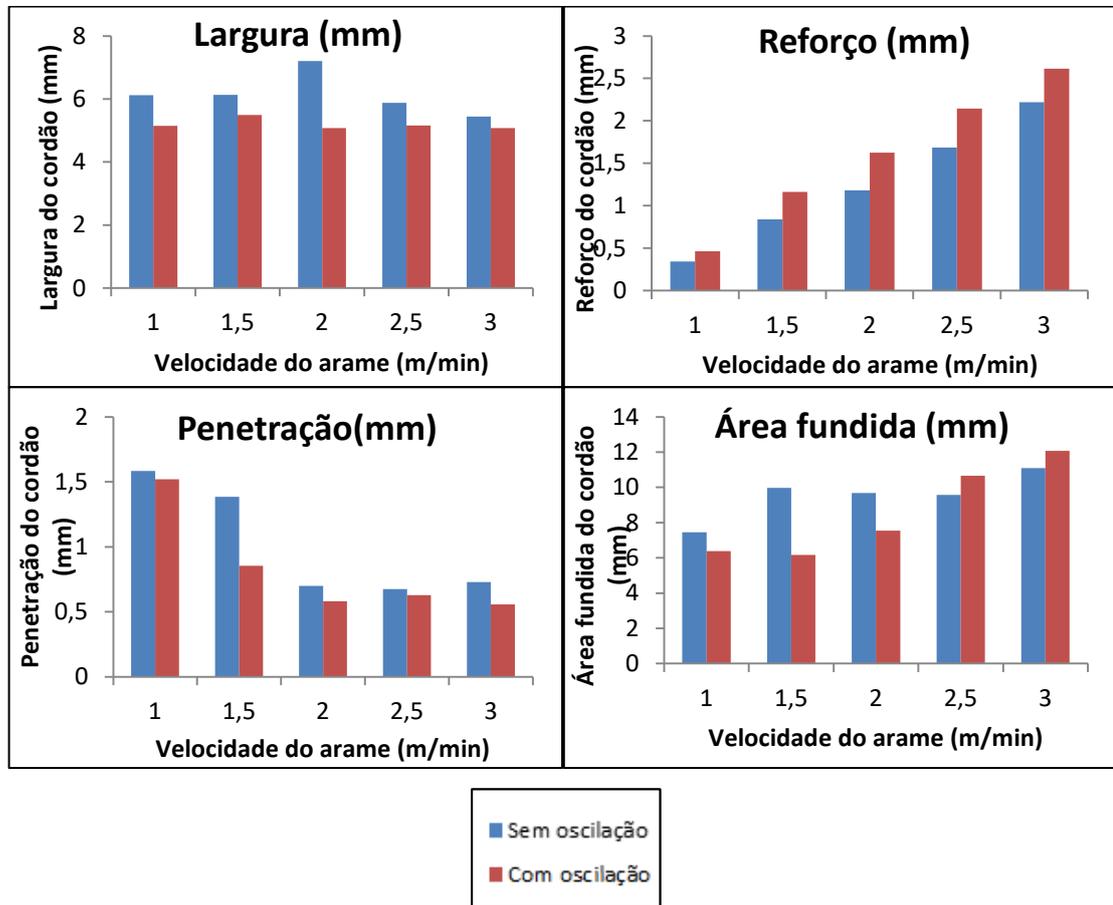
Nos ensaios de variação de velocidade do arame pôde-se observar a diferença na distribuição do material de adição durante o processo. Neste, a característica visual do cordão de solda final foi diferente quando empregada à oscilação do arame, como podemos visualizar na Figura 30. A partir das imagens obtidas efetuou-se uma avaliação quanto aos valores de largura, reforço, penetração e área fundida, para os resultados com e sem oscilação, disponíveis nos gráficos da Figura 31.

Figura 23 – Características morfológicas e superficiais dos cordões de solda obtidos



Fonte: Autora (2018).

Figura 24 – Gráficos de largura, reforço, penetração e área fundida referentes aos resultados das macrografias dos cordões de solda para o ensaio de variação de velocidade do arame



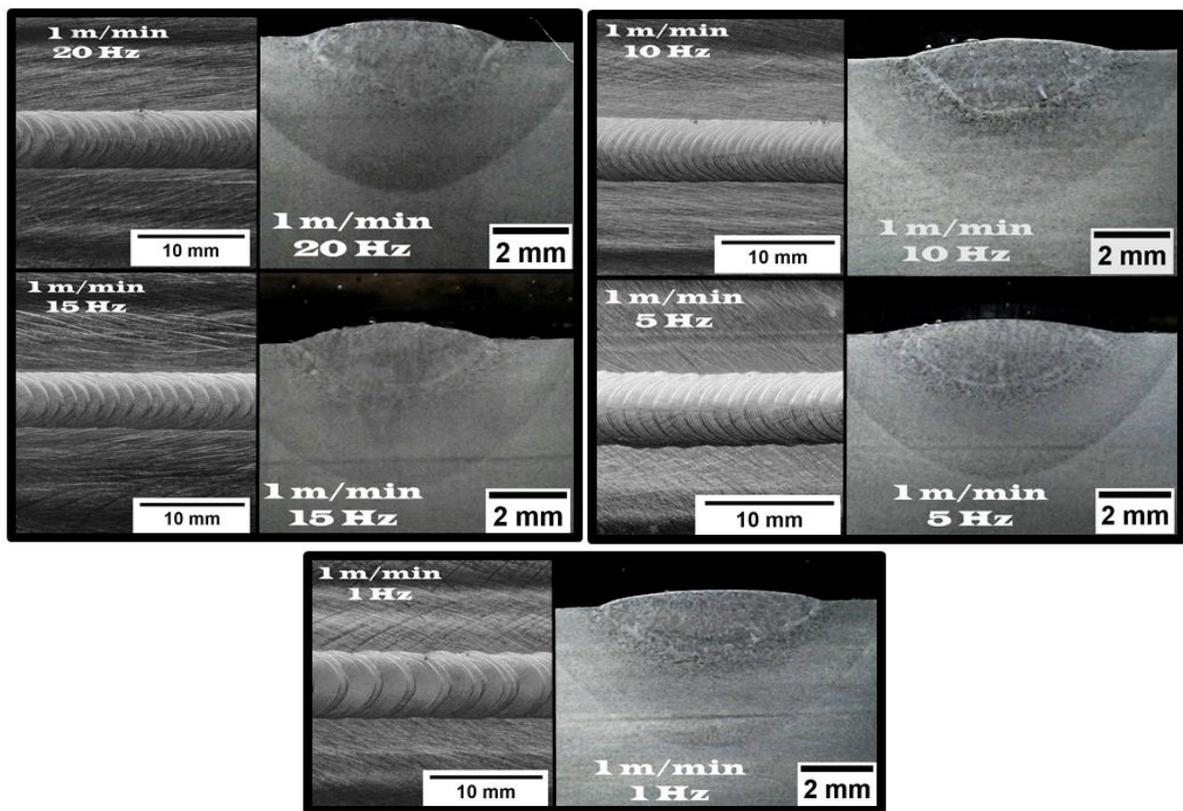
Fonte: Autora (2018)

Pode-se visualizar que a oscilação de arame impõe uma leve diminuição na largura e penetração dos cordões e, conseqüentemente, aumento no reforço dos mesmos. Com relação à área fundida para velocidades de arame de 1 a 2 m/min esta área foi menor com relação ao ensaio sem oscilação e para 2,5 e 3 m/min a área fundida foi maior. Este fato provém da relação de amplitudes e velocidade de arame utilizada no ensaio. Para a amplitude de 5 mm (juntamente as outras configurações de posicionamento) e para velocidades de arame entre 1 e 2 m/min a uma frequência de 20 Hz, o arame oscila dentro e fora do arco voltaico. Quando o arame oscila fora do arco voltaico o calor presente no arame é perdido para o ambiente e então é reabsorvido quando retorna a oscilar dentro do arco (retira calor do processo resultando numa área fundida menor). Em contrapartida, quando as velocidades de arame passam de 2,5 e 3 m/min este não tem tempo suficiente para sair do arco voltaico durante a oscilação mantendo-se aquecido.

5.2.2 Ensaio variando a frequência de oscilação

Com o intuito de obter uma melhor visualização do efeito imposto pela alimentação dinâmica do arame, escolheu-se a velocidade de avanço de arame crítica de 1 m/min e realizaram-se os ensaios variando a frequência de oscilação do arame. Os resultados obtidos para este ensaio estão disponíveis na Figura 32 e Figura 33.

Figura 25 - Resultados do ensaio de variação de frequência para avaliação das características morfológicas e macrografias do cordão

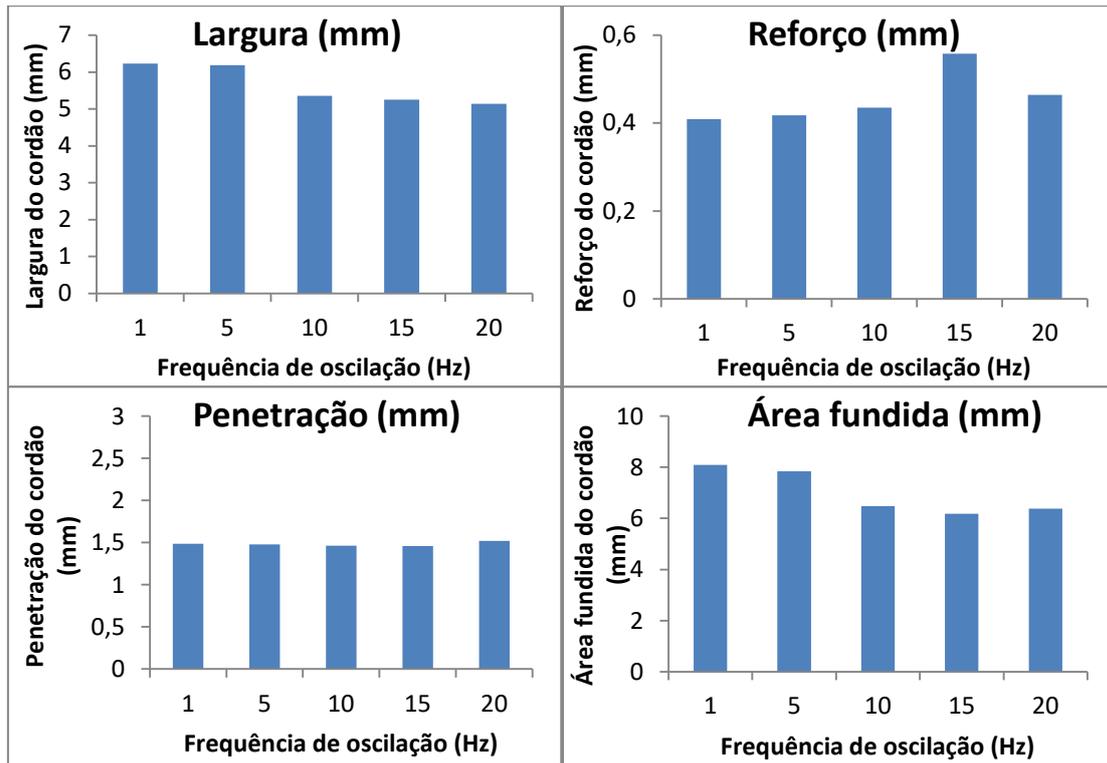


Fonte: Autora (2018).

Através das imagens é possível visualizar as escamas características da transferência de material por gotas. Conforme a frequência de oscilação do arame diminui o espaçamento entre as transferências metálicas aumenta. Para a frequência de 1 Hz observa-se a sobreposição de transferência pela oscilação e por vibração, pois a velocidade do arame é muito baixa e a frequência de oscilação também assim criando gotas grandes entre as oscilações, sobrepondo a gotas pequenas que formam enquanto o arame ainda está na posição de avanço e vibrando por conta do impacto no fim de curso, estas gotas acabam sendo transferidas, logo temos cerca de 1 ou 2 gotas pequenas transferidas durante a vibração de fim

de curso no avanço e uma gota maior a cada oscilação, formando uma característica visual do tipo três escamas espaço três escamas que pode ser visualmente assistida durante a soldagem.

Figura 26 – Gráficos de largura, reforço, penetração e área fundida referentes aos resultados das macrografias dos cordões de solda para o ensaio de variação de frequência de oscilação do arame



Fonte: Autora (2018)

Observa-se que a largura e a área fundida do cordão de solda diminuem conforme a frequência aumenta. Estes resultados estão correlacionados ao tamanho das gotas transferidas para cada frequência, uma gota maior conseqüentemente nos retorna uma largura e área maior do cordão isto ocorre para menores frequências. A partir de cerca de 10 Hz esta diferença já não é mais significativa, a frequência de transferência das gotas é muito alta a ponto de tornar a distribuição do material no cordão mais contínua. O reforço aumenta de forma gradual (exceto pela frequência de 15 Hz onde se observou um aumento em maior proporção no valor do reforço). Este aumento do reforço está relacionado a quantidade de material distribuída para uma maior frequência, como pode-se visualizar na Figura 32, quanto maior a frequência maior a concentração de escamas, o que indica uma maior frequência de

transferência de gotas sobrepondo-as. Com relação à penetração não foi observado diferença significativa nos resultados.

6 CONCLUSÃO

Com a realização deste trabalho pode-se concluir que:

- O dispositivo desenvolvido para alimentação dinâmica do arame atendeu os requisitos necessários para execução dos ensaios;
- Apesar do arame não estar engastado fisicamente ao dispositivo, mas, movimentar-se através do atrito gerado entre o arame e o conduíte, sua resposta com relação a oscilação é extremamente satisfatória;
- A força resultante máxima do dispositivo dependente da corrente máxima admissível pelo fio de cobre da bobina. Foi constatado que esta força é relativamente fraca quando se trata de independência para realização do movimento, pois qualquer mudança de carga sobre o conduíte pode gerar diferença no comportamento do dispositivo;
- Com relação aos ensaios de soldagem o dispositivo foi perfeitamente capaz de realizar a oscilação do arame durante o processo.
- Observou-se que tanto pela variação de velocidade do arame com frequência fixa quanto à variação da frequência com velocidade de arame fixa é possível modificar os resultados de largura, reforço e área fundida no cordão de solda, o que nos retorna a possibilidade de inúmeras combinações de possíveis resultados.

7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a realização deste trabalho e a partir dos resultados obtidos, sugere-se como tema para trabalhos futuros:

- Efetuar a construção de um novo protótipo com a utilização de ímãs de neodímio ao qual possuem campo magnético mais forte para, assim, avaliar seu comportamento quanto as pequenas variações de carga;
- Realizar ensaios de Micrografia para avaliar os efeitos metalúrgicos provindos da aplicação da técnica de alimentação dinâmica de arame na soldagem TIG;
- Avaliar os efeitos da técnica para outras configurações de amplitude, frequência e duty cycle;
- Implementar um controle de transferência de gotas através da utilização da alimentação dinâmica do arame.

REFERÊNCIAS

- ASHIDH, K.; KUMARI, A. S.; SUMESH, A.; RAJASEKARAN, N. **Influence of stick-slip effect on gas metal arc welding. Applied Mechanics and Materials**, vols 813-814, p. 438-445, 2015.
- BEIKIMCO. **BeiKimco Advanced Magnetics for Motion Control, linear voice coil actuators**. Vista (USA), 2018. Disponível em: <http://www.beikimco.com/motor-products/VCA-linear-voice-coil-actuator-all>. Acesso em 14 out. 2018.
- BRACARENSE, A. Q; MARQUES, P. V; MODENESI, P. J. **Soldagem, fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2009.
- CUNHA, T. V. et al. Desenvolvimento de um sistema adaptativo de alimentação de arame para o processo TIG. In: 4º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO. **Anais COBEF 2007**. São Pedro, 15 a 18 abr. 2007.
- ELETROAQUILA. **Tabela para fios de cobra AWG**. São José dos Campos, 2018. Disponível em: < <http://www.eletraquila.net/tabela-awg-mm>>. Acesso em 02 jul. 2018.
- FRONIUS. **Perfeição em soldagem; CMT: Cold metal transfer. Processo de solda MIG/MAG com arco voltaico em curto circuito**. São bernardo do campo, 2018. Disponível em: <www.fronius.com>. Acesso em: 30 mar. 2018.
- GODINHO, C. **Avaliação Experimental do Processo de Soldagem TIG Automatizado com Adição de Arame em Ângulo Tangencial**. 2017. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Depto. Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- MEREDITH, R. **Welding torch**. US Pat. 2274631 A, 24 fev. 1942. 4p.
- OLIVARES, E. A. G.; SILVA, R. H. G.; DUTRA, J. C. **Estudo da Técnica TIG Keyhole por Meio de Análise Comparativo entre Duas Tochas de Alta Produtividade na União de Chapas de Aço Carbono de Meia Espessura**. Soldagem & Inspeção, v. 20, p. 262-274, 2015.
- PAES, L. E. S. **Soldagem TIG orbital, uma contribuição para a mudança de paradigma de produtividade**. 2015. 25 p. Projeto de dissertação (Mestrado) – Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, jun. 2015.
- PHOTRON. **Download softwares: Photron fastcam Viewer and Photron fastcam Analysis**. Disponível em: <https://photron.com/software-downloads/>. Acesso em: 10 abr. 2018.
- PIGOZZO, I.O. **Soldagem TIG orbital: otimização de equipamentos e prospecções tecnológicas para procedimentos de pas-se de raiz**. 2014. 132 p. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Mecânica) – Depto. Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

PIKE, Greg. **Evaluation of the Tip-Tig Welding System, a Semi-automatic Hot Wire GTAW Process, Compared to Manual GTAW.** Preparado para National Shipbuilding Research Program. 17 set. 2013.

REIS, R.P.; SCOTTI, A. **Fundamentos e prática da soldagem plasma.** São Paulo: Artiliber Editora Ltda, 2007, 147p.

RICHARDSON, M. **Semiautomatic Cold Wire Feeder Systems Increase GTA Productivity.** Welding Journal. Janeiro de 1995, Vol. 74, pp. 51-54.

SCHWEDERSKY, et al. **Soldagem TIG de Elevada Produtividade: Influência dos Gases de Proteção na Velocidade Limite para Formação de Defeitos.** São Paulo, 2011.

SILVA, R. G. N. **Caracterização do processo de soldagem TIG com alimentação de arame dinâmica em alta frequência.** 2016. 84p. Trabalho de graduação – Engenharia de Materiais, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2016.

TIPTIGUSA. **The evolution of TIG welding systems.** Chicago, 2018. Disponível em: <<http://www.tiptigusa.com/>>. Acesso em: 30 mar. 2018.

THE FABRICATOR. **A publication of the fabricators and manufacturers association, Intl. New process, new welding dynamics.** ED CRAIG 8 nov. 2011. Disponível em: <<https://www.thefabricator.com/article/arcwelding/new-process-new-welding-dynamics>>. Acesso em: 30 mar. 2018.

WEMAN, Klas. **Welding process handbook.** 2. Ed. Cambridge england: woodhead publishing, 2013.

APÊNDICE A – GRÁFICOS RESULTANTES DO ENSAIO DE FREQUÊNCIA LIMITE DO DISPOSITIVO RELATIVA NO TEMPO PARA CADA AMPLITUDE DE VARIAÇÃO.

Frequência limite para amplitude de 6 mm (a), 4 mm (b) e 2 mm (c)

