

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

JÔNATHAS ALEXANDRE ALVES

**ANÁLISE, CARACTERIZAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE
COMPONENTES E SISTEMAS DE ALTA PERFORMANCE
DINÂMICA PARA ALIMENTAÇÃO DE CONSUMÍVEIS EM
PROCESSOS DE SOLDAGEM**

Exame submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para qualificação de tese de doutorado.

Orientador: Prof. Regis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng.

Co-orientador: Prof. Mateus Barancelli Schwedersky, Dr. Eng.

Florianópolis, 2017.

RESUMO

A disparidade entre patamares evolutivos de recursos eletroeletrônicos e mecatrônicos, componentes de sistemas de soldagem, vem ampliando as dimensões de uma barreira científico-tecnológica e mudando paradigmas. Novas variantes de processos vêm evoluindo, com base no aumento da estabilidade da fonte calorífica, assim como em efeitos obtidos por meio da variação controlada de energia. Em contrapartida, tais variantes têm evidenciado importantes requisitos por parte dos sistemas de alimentação de consumíveis. Enquanto o desenvolvimento de fontes de energia é continuamente agraciado com novos componentes de potência e controle, com alto desempenho dinâmico, os recursos de alimentação mantêm-se limitados. A manipulação mecânica dos consumíveis de solda, além de apresentar, naturalmente, performance dinâmica inferior às características das fontes de energia, não conta com desenvolvimento tecnológico compatível. Componentes não são devidamente estudados, mantendo a falta de informações técnicas. Há, também, poucas alternativas em termos de dispositivos para aplicações especiais. Tais fatores, associados, vêm alimentando uma cultura de empirismo e passividade, retardando o desenvolvimento de processos e sistemas. Alguns processos vêm se lançando como soluções para a indústria, baseando-se em sistemas de alimentação de alta performance dinâmica. Contudo, são apenas exemplos de que algo pode ser feito, já que integram sistemas fechados, não servindo como ferramenta de pesquisas. Buscando suplantando estas carências, o presente trabalho propõe contribuir com o desenvolvimento de sistemas mecatrônicos mais eficientes na adição de materiais em processos de soldagem. Para tanto, propõe-se determinar influências de componentes, tradicionais e experimentais, sobre o funcionamento de sistemas de alimentação de arame e pó. Tais informações serão cruzadas para propor configurações de sistemas de alimentação, em função de condições de aplicação de cada processo. Com base neste conhecimento, aliado ao desenvolvimento também de recursos de instrumentação, novos sistemas de alimentação dinâmica de arame e pó devem ser desenvolvidos. Alta performance dinâmica, robustez e flexibilidade apropriadas para ampliação do campo de pesquisas em processos de soldagem, são os principais requisitos. Os desenvolvimentos acerca dos sistemas de alimentação de arame favorecerão o empreendimento de pesquisas científicas sobre variantes de processos TIG e MIG/MAG, principalmente, sobre aqueles dependentes de alimentação dinâmica. Já os desenvolvimentos acerca da alimentação de consumível em pó

podem contribuir para novos estudos e consolidar aplicações de processos como LASER *Cladding* e PTA-P. Além do conhecimento básico tecnológico, se esperam, como resultados, também o desenvolvimento de protótipos avançados dos sistemas de alimentação.

Palavras-chave: Alimentação dinâmica; Arame e pó; Robustez; Flexibilidade; Pesquisas em processos.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E TECNOLÓGICA.....	5
2.1 ASPECTOS FÍSICOS E MECÂNICOS DOS MATERIAIS DE APORTE PARA SOLDAGEM.....	5
2.1.1 Materiais de Adição em Forma de Arame	5
2.1.2 Materiais de Adição em Forma de Pó.....	12
2.2 SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO DE MATERIAIS PARA SOLDAGEM.....	16
2.2.1 Aspectos Gerais em Alimentação de Arame	16
2.2.1.1 <i>Mecanismos de Tracionamento de Arame</i>	17
2.2.1.2 <i>Conduítes.....</i>	22
2.2.1.3 <i>Sistemas com Tracionamento de Arame Auxiliar</i>	27
2.2.1.4 <i>Desentortadores de Arame.....</i>	30
2.2.2 Alimentação Dinâmica de Arame em Processos de Soldagem	31
2.2.2.1 <i>Sistemas de Alimentação Dinâmica De Arame em Baixas Frequências.....</i>	32
2.2.2.2 <i>Sistemas de Alimentação Dinâmica de Arame em Altas Frequências.....</i>	37
2.2.3 Sistemas de Alimentação de Pó	44
2.2.3.1 <i>Mecanismo de Dosagem de Válvula Rotativa.....</i>	50
2.2.3.2 <i>Sensor de Vazão Mássica de Pó.....</i>	50
3 OBJETIVOS	53
3.1 OBJETIVO GERAL	53
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	53
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	55
4.1 MATERIAIS E MÉTODOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS DE APORTE PARA SOLDAGEM.....	55
4.2 MATERIAIS E MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DE COMPONENTES E SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO	57
4.2.1 Câmera de Alta Velocidade.....	58

4.2.2 Osciloscópio	60
4.2.3 Sistema de aquisição de variáveis elétricas SAP	60
4.2.4 Outros Instrumentos.....	61
4.3 MATERIAIS E MÉTODOS PARA ANÁLISE, CARACTERIZAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE COMPONENTES E SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO.....	62
4.3.1 Análise, Caracterização e Desenvolvimento de Sistemas de Alimentação de Arame para Soldagem.....	62
<i>4.3.1.1 Influência dos Desentortadores de Arame Sobre o Acionamento de Tracionadores.....</i>	<i>63</i>
<i>4.3.1.2 Influência de Diferentes Tipos de Conduítes Sobre o Acionamento de Tracionadores</i>	<i>64</i>
<i>4.3.1.3 Análise e Caracterização de Mecanismos de Tracionamento de Arame.....</i>	<i>65</i>
<i>4.3.1.4 Propostas de Novos Sistemas de Alimentação Dinâmica de Arame.....</i>	<i>67</i>
<i>4.3.1.5 Osciladores de Arame de Pequeno Porte Dedicados a Alimentação Dinâmica em Altas Frequências.....</i>	<i>72</i>
4.3.2 Sistemas de Alimentação de Pó.....	74
<i>4.3.2.1 Mecanismo de Dosagem de Pó.....</i>	<i>74</i>
<i>4.3.2.2 Sensor de Vazão Mássica de Pó.....</i>	<i>76</i>
<i>4.3.2.3 Sistema de Alimentação Dinâmica de Pó</i>	<i>78</i>
5 CRONOGRAMA DE ATIVIDADES.....	80
6 PREVISÃO ORÇAMENTÁRIA	82
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
8 REFERÊNCIAS	85

1 INTRODUÇÃO

A espantosa revolução da eletrônica digital dos últimos 60 anos vem contribuindo continuamente para modernização de todos os segmentos da indústria. Naturalmente, a área da soldagem, principalmente aqueles processos que se utilizam de um arco voltaico como ferramenta de trabalho, vem sendo agraciada pelo aperfeiçoamento constante destes recursos. Atualmente, as fontes de energia para soldagem evoluem rapidamente em termos de componentes de potência e controle de variáveis elétricas como corrente e tensão. A alta performance dinâmica fornecida por estas propicia, principalmente, atuação sobre aspectos geométricos e de estabilidade do arco, além de certo controle sobre a fusão de peça e materiais de adição [1, 2, 3]. Variantes dos processos TIG, Plasma e MIG/MAG foram criadas com base na manipulação da energia do arco em baixas e altas frequências [3]. Embora estas variantes sejam empregadas com sucesso em campo, sua sensibilidade em relação a perturbações no envio do material de aporte não admitem o grau de irregularidades que as versões básicas dos processos costumam tolerar.

Os recursos mecânicos de sistemas de soldagem também vêm apresentando evolução em alto grau, contudo, não nas mesmas proporções da eletrônica. Aliado a este fator, a natureza das interações mecânicas entre os componentes de mecanismos, tendem sempre a desfavorecer o dinamismo dos sistemas. Deste modo, as incompatibilidades dinâmicas entre os recursos eletroeletrônicos e os componentes mecânicos disponíveis, se impõem como grandes desafios ao avanço das tecnologias de aporte de materiais para soldagem. Frente a isto, a indústria e, até mesmo as instituições de pesquisa, têm adotado uma postura geral de passividade, mesmo em relação a conhecimento mais técnico sobre componentes de sistemas de alimentação há muito tempo disponíveis. Entretanto, a noção das proporções desta barreira, vem impulsionando o início de alguns desenvolvimentos a respeito de sistemas de alimentação mais eficientes e dinâmicos.

Em combate aos problemas de alimentação de arame em processos de soldagem, com os quais simplesmente se convivia até alguns anos atrás, fabricantes de equipamentos vêm tentando desenvolver equipamentos mais eficientes. Por exemplo, a empresa TBI oferece o sistema de tracionamento planetário como alternativa para o convencional tracionamento por roletes, o qual é passível de derrapagem sobre o arame ou provoca o dobramento deste. Ambos agora são disponíveis comercialmente, em forma de módulos de tracionamento,

principais ou auxiliares. Contudo, não há informações quantitativas consolidadas sobre as especialidades operacionais de cada princípio. Assim, não é possível saber sobre vantagens e limitações de cada tipo de tracionador na manipulação de diferentes tipos de arame, ou suas propriedades dinâmicas (velocidade, aceleração). Em outras áreas de fabricação mecânica que envolvem manipulação de fios, são empregadas outras variantes de mecanismos de tracionamento [4]. É importante saber se alguma destas tecnologias pode ser transferida para os sistemas de soldagem, no intuito de aumentar a disponibilidade de recursos.

Com relação às vias que conduzem o arame até a tocha, chamadas conduítes, também há pouca informação técnica relevante. A escolha do conduíte, em termos de eficiência, é totalmente intuitiva, baseada em argumentos comerciais que afirmam que um material é mais deslizante em relação a outro, ou que um material é mais resistente ao desgaste em relação a outro. Não há como comparar quantitativamente a influência de cada tipo (em função de material ou dimensões) na eficiência do sistema de alimentação. Estudos recentes [5, 6] vêm associando, quantitativamente, problemas de continuidade de alimentação ao contato dinâmico entre o conduíte e o arame. O efeito desta interação, conhecido como *Stick-Slip* promove variações aleatórias na velocidade instantânea do arame ao sair da tocha de soldagem. Entretanto, a pesquisa foi realizada para apenas dois tipos de conduítes.

Os problemas relacionados ao conduíte (*Stick-Slip*) e ao tracionamento por roletes (derrapagem, dobramento) normalmente tendem a se agravar em função da distância e disposição dos conduítes, além do grau de deformação dos arames. Tais fatores, na soldagem em campo, são de difícil controle, piorando as condições de alimentação. Quando a solda é de alta responsabilidade ou reparos nos cordões são inviáveis, usa-se tracionadores auxiliares chamados *Boosters*, em série com conjuntos de roletes desentortadores de arame. Com estes dispositivos, é possível reduzir as perturbações momentâneas da alimentação, diminuindo a incidência de defeitos nas soldas. Entretanto, o esforço aplicado para desentortar o arame acarreta em aumento de carga para os tracionadores, podendo limitar sua capacidade. Contudo não há informações técnicas sobre o quanto os desentortadores podem sobrecarregar os motores de tracionamento. Tal fato pode acarretar em outros problemas, em contrapartida ao desentortamento.

Há alguns anos, pesquisas vêm relacionando resultados inéditos em soldagem com condições especiais de inclusão do material de adição. Sobre estes fundamentos, alguns processos já se lançaram como

soluções comerciais e estão sendo aplicados na indústria. Entre outras diferenças menos significativas, estes processos são dotados de equipamentos de alimentação de material com características especiais. Estes permitem variação controlada da quantidade de material com rapidez consonante com a dinâmica de outros fenômenos envolvidos no processo. Entretanto, embora muitos dos resultados positivos indicados por fabricantes tenham se confirmado em laboratório [7, 8, 9] foram detectados comportamentos discordantes entre o princípio de funcionamento dos sistemas de alimentação e os padrões de adição de material junto ao arco [10]. Alimentadores concebidos em ambiente de laboratório para pesquisa científica, também apresentam certo grau de divergência entre o acionamento e o real perfil de alimentação nas proximidades do arco. Na maioria dos casos, as limitações ocorrem por ausência de recursos que auxiliem a obtenção da performance dinâmica desejada [6,11,12].

Existem também processos de soldagem alimentados com material de aporte em forma de pó, por exemplo PTA-P (*Plasma Transferred Arc With Powder*) e LASER, ambos aplicados industrialmente em soldagem de revestimento (*cladding*). A adição de pó nestes processos é realizada via transporte pneumático de partículas, cuja vazão é regulada pelo mecanismo dosador do alimentador de pó. O processo PTA-P já se mostrou importante ferramenta de pesquisa para desenvolvimento de materiais [13,14]. Contudo, as misturas experimentais tendem a apresentar escoabilidade incompatível com os sistemas de alimentação disponíveis. Embora um alimentador de pó tenha favorecido pesquisas sobre novas ligas metálicas [14,15], seu mecanismo dosador era frequentemente travado pelos materiais manipulados. Outro recurso inexistente ainda para sistemas de alimentação de pó, consiste em um sensor de vazão mássica. Esforços para desenvolvimento de tal instrumentação foram empreendidos [12], contudo, ainda não se dispõe de um sensor para monitoramento ou realimentação de malha de controle. Os mesmos tipos de alimentadores, limitados em termos de instrumentação e alimentabilidade, são usados no processo LASER *Cladding*. Avanços devem ser conquistados já que, sendo o LASER uma fonte de energia de alta estabilidade, a qualidade e produtividade das operações de cladeamento se tornam ainda mais dependentes da regularidade de alimentação.

Todas as problemáticas supracitadas são a força motriz para realização deste trabalho. As contribuições se fundamentam no desenvolvimento e aperfeiçoamento de tecnologias de manipulação e medição de perfis de adição de material, visando acréscimos para

robustez e flexibilidade. Por fim, a execução do presente trabalho implica em produzir conhecimento científico e tecnológico nacional em termos de equipamentos. Uma vez disponibilizados, podem contribuir tanto para evolução de pesquisas em processos de soldagem como para o avanço tecnológico da indústria brasileira. De fato, o Brasil vive um momento em que a indústria de petróleo e gás vem sendo exigida, em termos de desenvolvimento de novas tecnologias, para extração de combustíveis fósseis [16]. Isto porque, recentemente, foram encontradas vastas jazidas em camadas profundas de nosso território [17]. Diante disto, a PETROBRAS vem formando parceria com o LABSOLDA e, atualmente, o projeto Avanços no Processo TIG Aplicado à Soldagem Orbital Automática e Semi-automática de Tubulações está em andamento. Aqui está um exemplo real de que grandes obras de engenharia estão dependendo de avanços em tecnologia e conhecimento sobre os princípios elementares de um processo de soldagem.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E TECNOLÓGICA

Na indústria mecânica a soldagem é empregada principalmente para efetuar união, conferir formato geométrico a peças e estruturas, ou ainda, para revestir componentes mecânicos ou parte destes com materiais especiais. Alguns processos, por sua natureza e patamar evolutivo, mostram-se apropriados até mesmo para elaboração de materiais de adição [13,14]. Outros, alvos de constante evolução tecnológica, mostram-se promissores para fabricação de peças por manufatura aditiva [18]. Todas as aplicações supracitadas envolvem adição de material (salvo uniões autógenas, refusões) cujo perfil de alimentação é determinante para o sucesso das operações. Por isto, a fundamentação teórica deste trabalho vem abordar características fundamentais e estudos analíticos sobre sistemas de aporte de aporte para soldagem. Contudo, primeiramente, aspectos físicos e mecânicos dos próprios materiais de adição serão apresentados.

2.1 ASPECTOS FÍSICOS E MECÂNICOS DOS MATERIAIS DE APORTE PARA SOLDAGEM

Os materiais de adição para soldagem se apresentam em diversos formatos, contudo sempre no estado sólido. Os processos como MIG/MAG, TIG, Plasma e LASER (e suas variantes) podem ser alimentados com consumíveis em forma de arame maciço, pó ou um formato híbrido (aramé tubular), dependendo do processo. Estes processos têm sido alvos de constante evolução tecnológica por conferirem qualidade e/ou produtividade a produtos e linhas de produção industriais. Naturalmente o aprimoramento destes vem dependendo, além de outros aspectos, de maior eficiência por parte dos sistemas responsáveis pela alimentação de materiais. A seguir serão abordados os materiais de aporte tipo arame maciço, tubular e pó, em termos de aspectos físicos e mecânicos de interesse deste trabalho.

2.1.1 Materiais de Adição em Forma de Arame

Os arames maciços ou bobinados representam um dos tipos de material de adição mais empregados por processos de soldagem na fabricação mecânica. São utilizados em processos a arco voltaico de eletrodo consumível, não consumível e LASER. São fabricados por trefilação [19]. A Figura 2.1 ilustra aspectos deste processo.

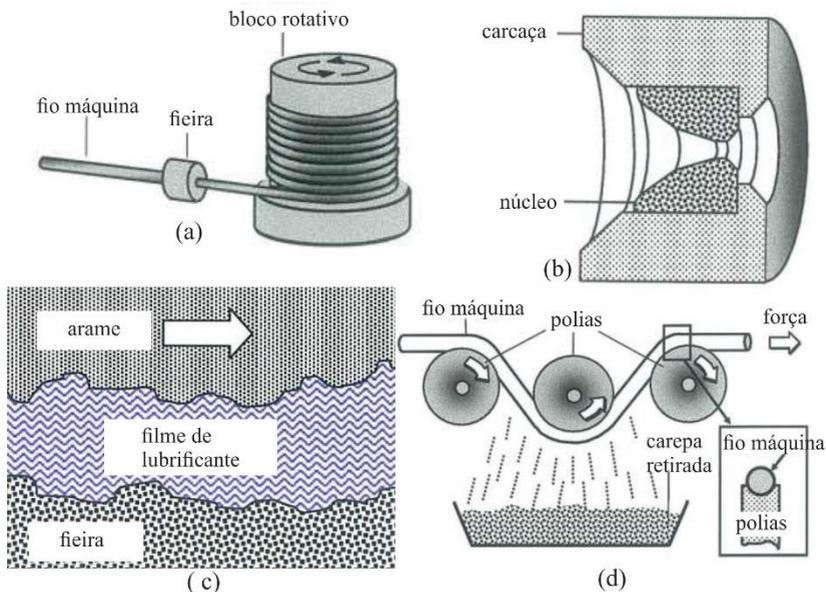


Figura 2.1 – Aspectos de fabricação de arames maciços [19]: a) trefilação; b) feira; c) lubrificação; d) decapagem mecânica

A matéria prima do arame se chama fio máquina, um arame de diâmetro maior, obtido por laminação. Basicamente, como esquematizado na Figura 2.1 (a), a trefilação força a passagem do fio máquina por uma feira. No processo, o arame é tracionado por blocos rotativos onde, ao sair da feira, são bobinados. A feira, ilustrada na Figura 2.1 (b), consiste em uma ferramenta dotada de canais cônicos em série que reduzem o diâmetro do fio. Possui geralmente um núcleo de carboneto de tungstênio para conferir resistência ao desgaste para a ferramenta [20]. Lubrificantes são utilizados no processo para redução do atrito entre a feira e o arame, como mostrado na Figura 2.1 (c) garantindo durabilidade à ferramenta e qualidade à superfície do fio [20]. No caso de arames de aço, há uma fase anterior e outra posterior à trefilação. A fase anterior se trata da decapagem do fio máquina, que consiste na quebra da camada externa oxidada por meio de deformação por polias, como ilustra a Figura 2.1 (d) e subsequentes operações de remoção com escovas e ar comprimido [20]. A decapagem também pode ser química, por imersão em ácidos e gases [20]. A fase final consiste no cobreamento. O material trefilado passa por um banho de ácido sulfúrico e, posteriormente é imerso em uma solução na qual

coBRE adere a superfície externa do fio por eletrodeposição. Tal camada protege o arame contra a oxidação e sua espessura depende, principalmente, do tempo de exposição [19]. Além deste benefício, a camada de cobre corrige as irregularidades da superfície do arame (resultantes da trefilação), favorecendo a passagem de corrente elétrica (melhor contato) no processo de soldagem [19]. A Figura 2.2 ilustra o acabamento final da superfície do arame em quatro etapas, desde a saída da fieira (onde o arame apresenta diâmetro de aproximadamente 1,21 mm) até o polimento da superfície cobreada (onde o arame está pronto para ser utilizado, com diâmetro em torno de 1,18 mm).

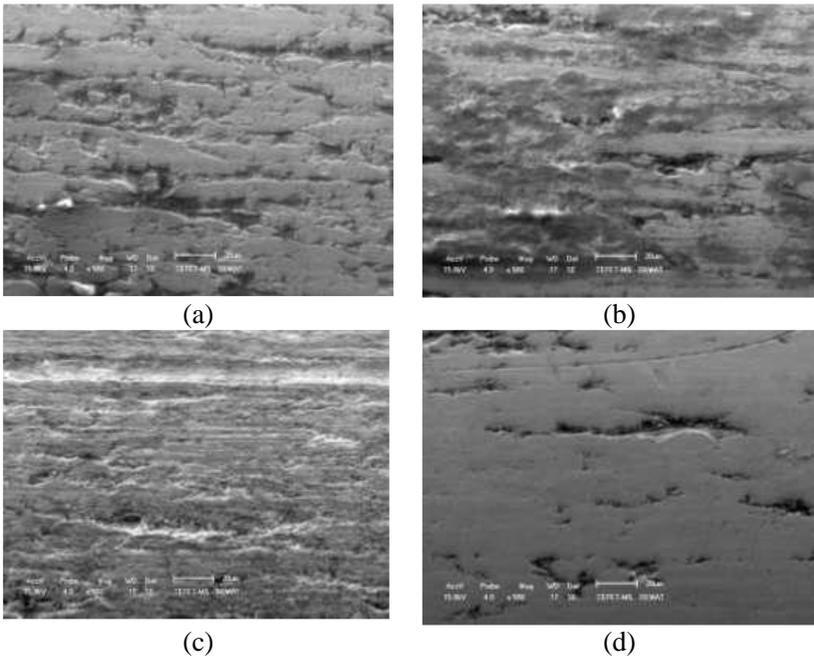


Figura 2.2 – Ampliação de 500 vezes da superfície de arame de aço após etapas de fabricação [19]: a) sem cobre e sem limpeza; b) sem cobre e com limpeza; c) com cobre e sem polimento; d) com cobre e com polimento

Aspectos de qualidade na fabricação de arames maciços são extremamente influentes sobre suas propriedades de fusão em processos de soldagem. Em um trabalho [21] foram adotadas duas bobinas de arame ER70S-6 de 1,0 mm de diâmetro, fornecidas pelo mesmo fabricante. Foram obtidos valores médios de diâmetro e resistência elétrica divergentes, enquanto análises apontaram aproximadamente

mesma composição química. Contudo, sob mesmas condições de soldagem, o arame de menor diâmetro (3,5% menor) apresentou taxa de fusão em torno de 4% superior.

Além dos arames maciços, em soldagem são também empregados arames tubulares. Os arames tubulares consistem em tubos com material em pó no seu interior. Dependendo do material do núcleo, os arames tubulares podem ser autoprotégidos ou não. O conteúdo do núcleo pode apresentar elementos de liga, materiais formadores de escória e/ou formadores de gases de proteção [22]. De acordo com o material do núcleo, podem ser classificados como Metal Cored, Flux Cored e Autoprotégidos. Os Metal Cored possuem pós somente metálicos no seu interior, com função de fornecer elementos de liga para obtenção de depósitos com características metalúrgicas especiais. Já os Flux Cored contêm em seu núcleo pós não metálicos, os quais possuem função de fornecer elementos de liga, mas, principalmente, formar uma escória capaz de proteger a poça e dificultar seu escoamento em soldagem fora de posição. Por fim, os Autoprotégidos possuem elementos em pó capazes de produzir gases que protegem a poça de fusão, dispensando a necessidade de fontes externas de gases de proteção. É uma opção para substituir o processo de Eletrodos Revestidos, uma vez que proporciona maior produtividade [22]. Sua fabricação, ilustrada pela Figura 2.3, parte de uma bobina de fita metálica.

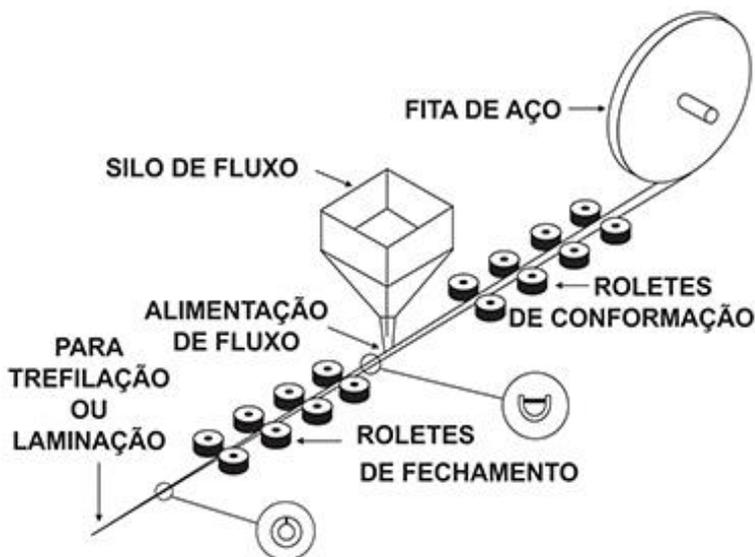


Figura 2.3 – Processo de fabricação de arames tubulares [22]

Ao passar por um primeiro estágio composto pelos roletes de conformação, a fita é transformada em uma espécie de calha. Com este formato, esta passa por baixo do canal de descarga de um silo (funil) que contém o fluxo. Assim, o fluxo é distribuído uniformemente ao longo do tubo, que vai se formando quando a calha passa pelos roletes de fechamento. Após isto, o arame formado segue para o processo de trefilação (ou laminação) sendo posteriormente bobinado em carretéis.

A bobinagem dos arames em carretéis sujeita-os a deformações plásticas e elásticas. As deformações plásticas tendem a impor dificuldades ao processo de soldagem. Para estimar o quanto o arame está deformado são avaliados os parâmetros *Cast* e *Helix*, representados na Figura 2.4. As deformações do arame dificultam sua alimentação, além de danificar os elementos com os quais mantém contato na tocha de soldagem e no sistema de alimentação.

Se uma porção de arame for desenrolada, cortada e posteriormente liberada, esta tenderá a assumir uma forma aproximadamente circunferencial com diâmetro diferente daquele assumido no rolo. A medida deste diâmetro, no plano da bobina, corresponde ao *Cast*. A curvatura do arame, quanto maior, tende a reduzir a área de contato entre este e bicos de contato, desgastando-os precocemente em função do atrito localizado e da dificuldade de transferência de corrente. O aumento da curvatura também induz maior atrito entre o arame e o conduíte. O corte e posterior liberação de uma porção de arame também faz com que as extremidades do arame apresentem um espaço entre si na direção perpendicular ao plano da espira, tendendo a formar uma hélice. Tal espaçamento é chamado de *Helix*. As principais consequências para o uso de arames com o *Helix* fora dos padrões são semelhantes aos efeitos do *Cast* [19,23].

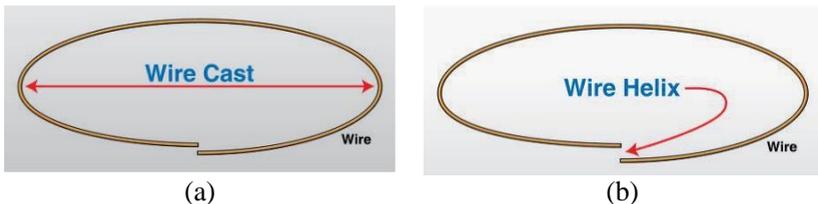


Figura 2.4 – Parâmetros de deformação de arames bobinados: a) *Cast*; b) *Helix* [23]

Nos processos de eletrodo consumível tradicionais (leia-se MIG/MAG e suas variantes), há uma total interdependência entre energia e consumível. Para que se mantenha o comprimento do arco e o

Stick-Out (comprimento polarizado do arame externo ao bico de contato) é preciso que se adicione quantidade de material proporcional à energia entregue ao processo. As faixas operacionais desta relação energia versus material dão origem à diversas formas de transferência metálica. A Figura 2.5 ilustra alguns modos de transferência metálica para o processo MIG/MAG. Em baixos níveis de energia e adição de arame obtém-se transferência por curto-circuito, apresentada na Figura 2.5 (a), onde a porção fundida do arame é transferida para a poça de fusão por tensão superficial, no momento do contato. Níveis de energia e alimentação intermediários apresentam transferência com característica globular onde, como ilustra a Figura 2.5 (b), uma gota de diâmetro maior ou igual ao eletrodo se forma na extremidade do arame e se transfere por voo livre para a poça. Existem subclassificações deste modo de transferência de acordo com o comportamento e tamanho da gota, podendo apresentar caráter repulsivo, rotativo ou goticular. Altos níveis de energia e velocidade de arame resultam no modo conhecido como Spray no qual, como ilustra a Figura 2.5 (c), o material fundido da extremidade do arame “escoa” para a poça de fusão, formando um filete de material fundido no interior do arco.

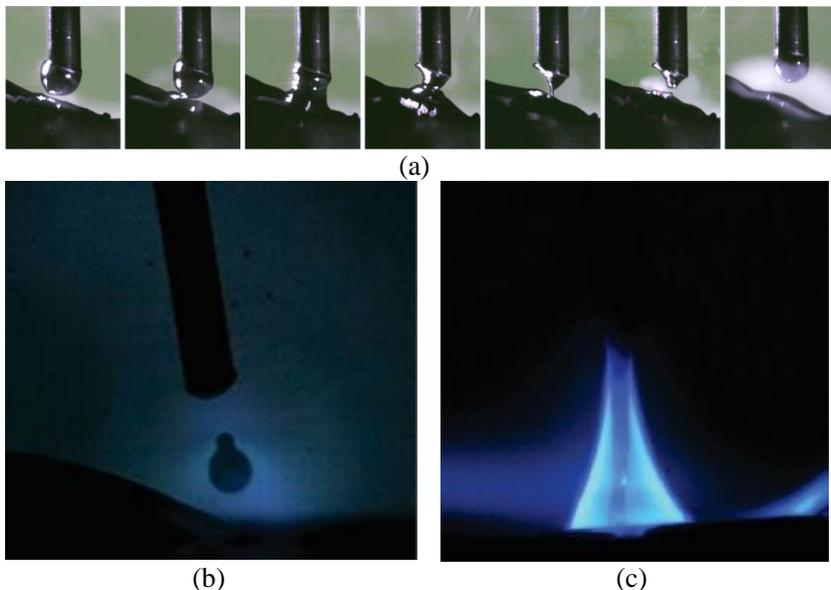


Figura 2.5 – Principais modos de transferência do processo MIG/MAG: a) transferência por curto-circuito [24]; b) transferência globular; c) transferência spray [25].

Os modos de transferência metálica do arame nos processos de eletrodo não consumível, como TIG e Plasma, se dão de maneira diferente, já que o arame não é o eletrodo. Segundo [6], a transferência metálica no processo TIG se dá fundamentalmente de dois modos: a transferência em ponte (não interrompida) e a transferência intermitente. Parâmetros Geométricos como ângulo de alimentação (entre arame e eletrodo) e distância eletrodo-peça, além de parâmetros do processo como velocidade de arame e corrente de soldagem são determinantes para definir o modo de transferência. O ângulo de alimentação determina a distância entre a extremidade do arame e a ponta do eletrodo. A Figura 2.6 apresenta alimentação contínua no TIG cold wire. Nota-se que o aumento da distância entre as extremidades do eletrodo e do arame favorecem a formação da ponte metálica. Na Figura 2.7, uma simulação numérica mostra que o arame, quando inserido rente à chapa, invade uma isoterma mais fria.



Figura 2.6 – Modos de transferência metálica de arame maciço no processo TIG [26]: a) ponte metálica com 65°; b) transferência intermitente com 66,5 °; c) transferência intermitente grosseira com 68,5°

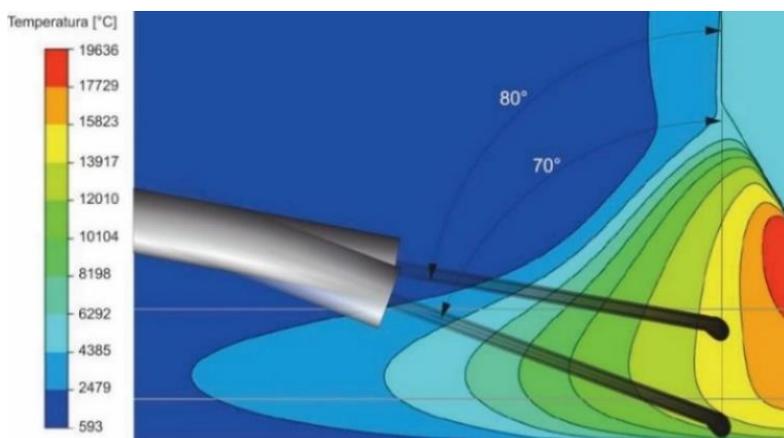


Figura 2.7 – Simulação numérica para alimentação de arame no processo TIG [27]

2.1.2 Materiais de Adição em Forma de Pó

Os pós metálicos, normalmente utilizados em processos de soldagem como PTA-P e *LASER Cladding*, são obtidos por atomização ou trituração. A Figura 2.8 esquematiza estes métodos de produção de pós. Existem outros processos, com menor expressão no mercado.

A atomização, esquematizada na Figura 2.8 (a) é o processo mais utilizado para produzir pós metálicos para aplicações gerais (ASM Handbook [28]). Consiste em expandir um fluxo de metal líquido por meio da injeção de gás (ar atmosférico ou gás especial), água ou óleo sob pressão. Este processo pode produzir partículas com o formato aproximadamente esférico, como mostrado na Figura 2.8 (b). O trituração (ou moagem), representado pela Figura 2.8 (c), é o processo mais econômico e mais indicado para, segundo ASM Handbook, se produzir pós de metais duros e frágeis. Este método emprega rolos, martelos, mandíbulas ou bolas para trituração dos metais a partir de blocos sólidos. Os fragmentos produzidos por este método, como ilustra a Figura 2.8 (d), são angulares e não possuem forma definida, apresentando geralmente superfície escarpada.

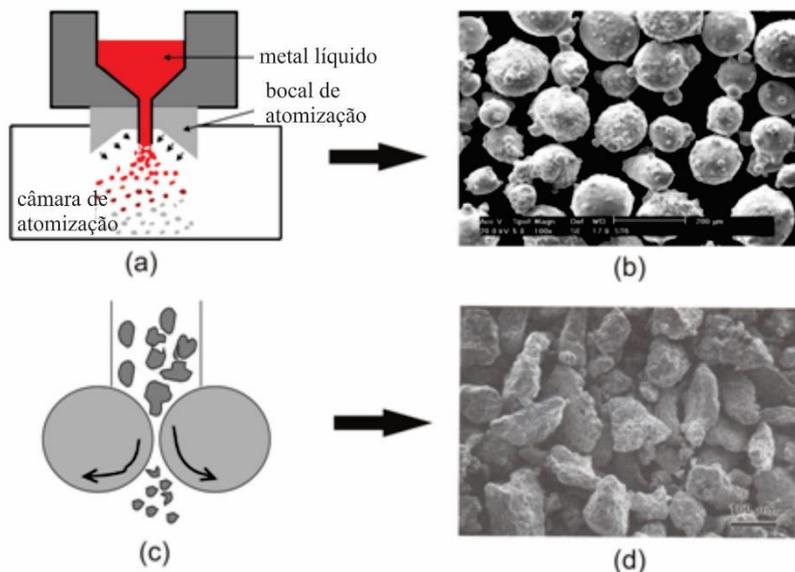


Figura 2.8 – Métodos de produção de pós [15]: a) processo de atomização. b) pó atomizado; c) processo de trituração; d) pó triturado

A padronização dos pós metálicos usados no processo PTA-P, por exemplo, se dá, segundo Marconi [29], por meio do peneiramento de 100 g de pó em peneiras de diferentes aberturas de malha, sendo separado em várias porções de diferentes faixas granulométricas. Estas porções são distribuídas em torno de um valor médio, como mostra o exemplo da Figura 2.9. Os diâmetros de partículas recomendadas variam de 45 μm (mínimo) a 250 μm (máximo), valores estes estabelecidos por questões metalúrgicas (pois partículas pequenas demais superaquecem e partículas muito grandes não se fundem totalmente) ou operacionais (os sistemas de alimentação apresentam dificuldades em manipular materiais muito finos ou constituídos por grãos muito grosseiros). É sugerido por Xibao e Hua [30] que a seleção da faixa de distribuição granulométrica das partículas dependa dos parâmetros de soldagem e do material a ser utilizado, devido ao comportamento térmico de cada pó.

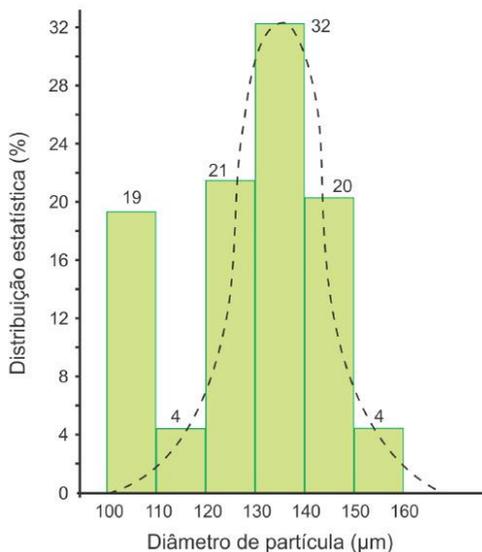


Figura 2.9 – Distribuição estatística de faixas granulométricas em função do diâmetro de partícula para fabricação de materiais em pó para soldagem [29]

Uma das características mais importantes para manipulação de materiais em pó diz respeito a escoabilidade. Trata-se de uma expressão referente à capacidade de fluir que um pó apresenta. De acordo com Prescott e Barnum [31], é resultante não só da combinação das propriedades físicas e químicas do material que afetam o seu escoamento, mas também do equipamento usado para manipular,

armazenar ou processar o material. Conforme reporta Schulze [32], quando um silo é descarregado, dois padrões distintos de escoamento podem ocorrer: o escoamento em massa e o escoamento em funil, ambos representados na Figura 2.10. No escoamento em massa, todas as partículas contidas no silo se movem durante a descarga. No caso do escoamento em funil, somente uma porção do pó do silo desce durante a descarga enquanto o resto permanece estático, formando zonas de estagnação.

Devido à coesividade entre as partículas, um arco ou um caminho de rato podem se formar durante a descarga de um silo. Estes defeitos de escoamento são ilustrados na Figura 2.11. Um arco (também chamado de ponte ou cúpula) é uma obstrução estável que se forma no ponto acima do canal de descarga, suportando todo peso do conteúdo do reservatório e evitando o escoamento do pó. Já o defeito de caminho de rato é um canal ou cavidade vertical criada pelo esvaziamento da coluna superior ao canal de descarga do reservatório. O material se deixa compactar em zonas de estagnação e permanece estático até que uma força externa provoque uma avalanche (ASM Handbook [28]).

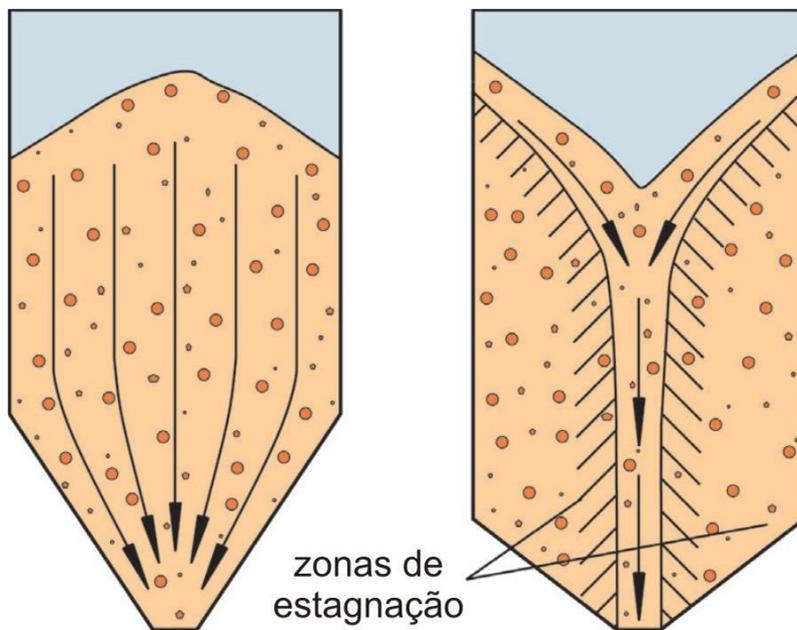


Figura 2.10 – Escoamento em silos: a) à esquerda, escoamento em massa; à direita, escoamento em funil [32]

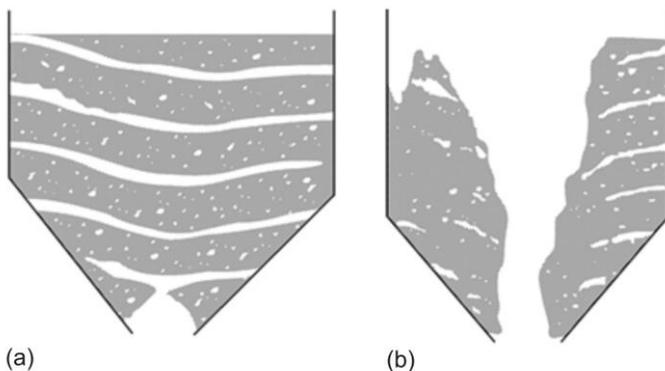


Figura 2.11 – Defeitos de escoamento: a) formação de arco, ponte ou cúpula; b) Formação de caminho de rato [28]

Utilizando recurso de filmagem em alta velocidade no LABSOLDA, pode ser observada alimentação da poça de fusão com pó metálico no processo de soldagem PTA-P. As partículas descem em voo livre em torno do arco plasma. A maioria cai sobre a poça de fusão, enquanto certa quantidade cai nas periferias (aquelas que caem na parte frontal são fundidas com o avanço da poça). Algumas delas, aparentemente em estado pastoso, aderem as laterais do cordão e, uma minoria é rebatida pela superfície da peça para longe da poça. A Figura 2.12 ilustra como ocorre a alimentação de pó no processo PTA-P.

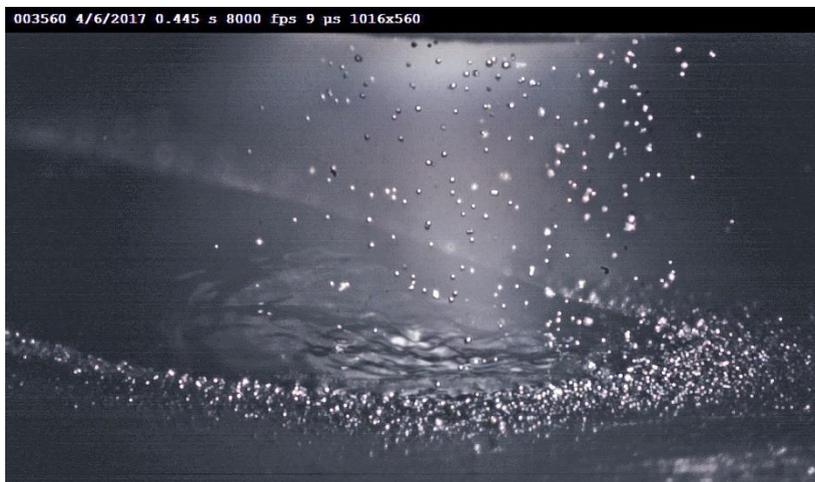


Figura 2.12 – Alimentação do processo PTA-P com liga Inconel 625 em pó

2.2 SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO DE MATERIAIS PARA SOLDAGEM

Em seguida, serão abordados com os devidos detalhes sistemas de alimentação de arame e pó. As abordagens partirão de uma revisão sobre versões convencionais dos equipamentos, seguidas de descrições de sistemas de alto desempenho dinâmico e suas limitações.

2.2.1 Aspectos Gerais em Alimentação de Arame

Os sistemas de alimentação de arame empregados nos processos de soldagem exercem função de supri-los com material de aporte. Basicamente são compostos por uma estrutura de suporte para uma bobina de arame (carretel), um mecanismo de pares de roletes motorizados (pelo qual o arame é movimentado) e um conduíte. A Figura 2.13 apresenta, em aspectos gerais, um cabeçote alimentador de arame que compõe um equipamento para soldagem MIG/MAG, do fabricante OTC. No perfil do equipamento podem ser localizados o suporte do carretel e o mecanismo de tracionamento por roletes, o qual é apresentado detalhadamente na próxima sessão.

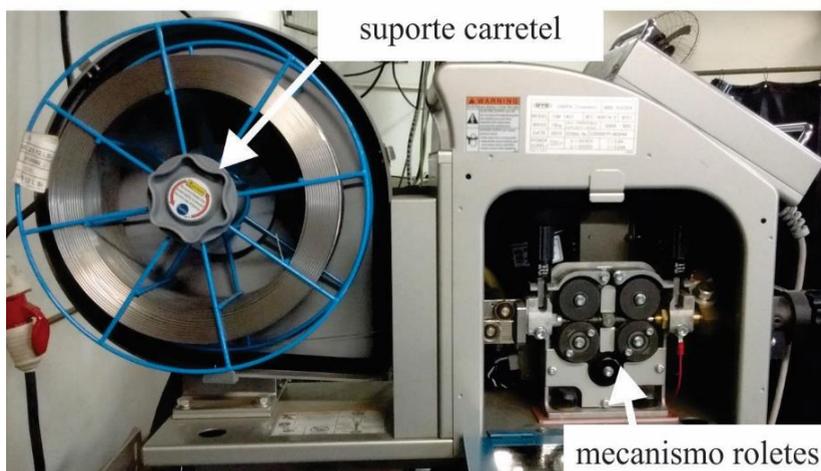


Figura 2.13 – Cabeçote alimentador de arame OTC: perfil do equipamento com principais componentes

2.2.1.1 Mecanismos de Tracionamento de Arame

O mecanismo de roletes é o dispositivo responsável pelo tracionamento do arame, desenrolando a bobina e impulsionando-o em direção à tocha de soldagem ou ao direcionador de arame. É mostrado com maiores detalhes na Figura 2.14. O tracionamento com roletes impõe esforços axiais e radiais sobre o arame, de modo a movimentá-lo. É composto tipicamente por dois pares de roletes. Os roletes inferiores são acionados por motor, criando o esforço axial do tracionamento. Os roletes superiores são pressionados contra o arame por alavancas de pressão, gerando o esforço radial. Normalmente a alavanca possui escala sem unidade. Dependendo do diâmetro e tipo (tubular ou maciço), um patamar de pressão é recomendado [33], como sugere a Tabela 2.1. A eficiência de tracionamento depende da pressão que os roletes imprimem sobre o arame. Se insuficiente, permite escorregamento. Se demasiada, deforma o arame e sobrecarrega o motor.

Tabela 2.1 – Relação escala de pressão em função do diâmetro do arame [33]

Wire diameter	Wire pressure scale	
	Solid wire	Flux cored wire
ϕ 1.6, ϕ 2.0	4 - 5	3 - 4
ϕ 1.2, ϕ 1.4	3 - 4	2 - 3
ϕ 0.9, ϕ 1.0	2 - 3	
ϕ 0.8	1 - 2	

Os roletes se dispõem geralmente na posição vertical. Eles contêm sulcos que mantêm o arame alinhado a um tubo capilar (componente comentado mais adiante). Os roletes podem apresentar sulcos lisos ou ranhurados, como mostrado na Figura 2.15. Sulcos lisos são dedicados ao tracionamento de arames maciços, os quais toleram maior pressão dos roletes quando a alimentação exige maior esforço. Já sulcos ranhurados são apropriados ao tracionamento de arames tubulares. As ranhuras deformam localmente a superfície do arame originando marcas em forma de vales consecutivos, como mostrado na Figura 2.16. Assim, as ranhuras e as impressões formam um mecanismo de transmissão (semelhante a pinhão e cremalheira), no qual uma menor pressão radial é exigida para realizar o tracionamento. Menor pressão é necessária neste tipo de arame para evitar seu “achatamento”, o que provocaria dificuldades para este passar pelo orifício do bico de contato da tocha ou do direcionador de arame.

Os tubos capilares, também mostrados na Figura 2.14, são fundamentais para o funcionamento do sistema. São peças tubulares instaladas alinhadamente com os sulcos dos roletes. Uma extremidade deve sempre situar-se mais próxima possível dos roletes. Sua função principal é evitar o dobramento do arame por flambagem entre si e os roletes, reduzindo o espaço livre que o arame teria para se deformar.

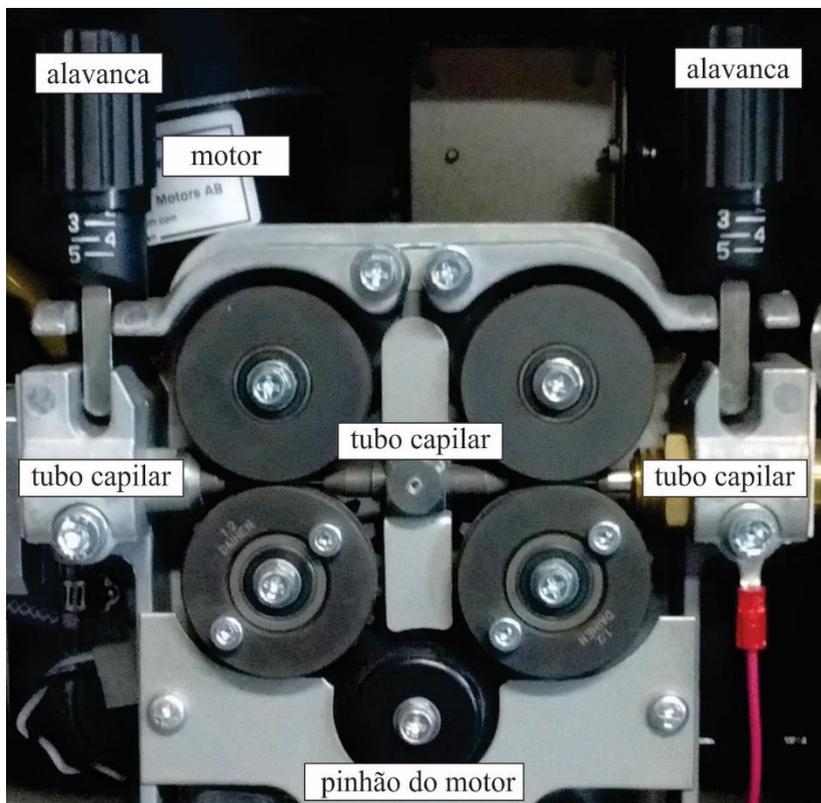


Figura 2.14 – Mecanismo de tracionamento de arame por sistema de roletes



Figura 2.15 – Tipos de roletes: a) sulcos ranhurados; b) sulcos lisos

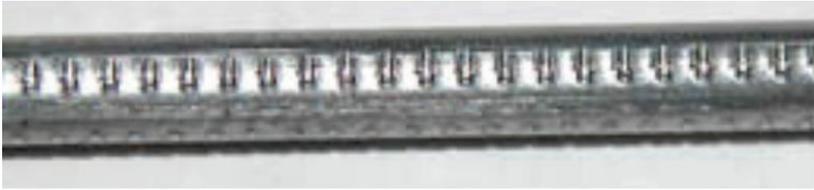


Figura 2.16 – Impressões provocadas por roletes ranhurados em arame tubular

Em função da resistência mecânica do arame, o tracionamento por roletes pode apresentar dois problemas típicos, quando se fazem presentes esforços contrários à alimentação: o escorregamento (no caso de arames mais resistentes como o aço) e o dobramento (no caso de arames mais maleáveis como o alumínio).

O escorregamento ocorre geralmente no início e fim da alimentação. Também acontece quando o processo exige variações de velocidade de arame ou este sofre esforços contrários ao seu movimento. Nos processos MIG/MAG, por exemplo, tal fenômeno modifica a relação material/energia e pode provocar a fusão do arame no bico de contato, como mostrado no item (a) da Figura 2.17. Como tentativa prática de evitar o escorregamento, às vezes, se usa roletes ranhurados mesmo para arames maciços. Embora reduzam o escorregamento, a pressão que exercem sobre arames maciços criam entalhes sequenciais (semelhantes às marcas mostradas na Figura 2.16), porém com bordas em relevo. Tal relevo age como o picado de uma lima sobre o tubo capilar, conduíte e bico de contato. Sofrendo desgaste precoce o orifício do bico muda seu formato, modificando o direcionamento do arame e os padrões de contato elétrico, fatores que prejudicam a estabilidade do processo. O item (b) da Figura 2.17 apresenta um bico novo para comparação com um bico desgastado, este último mostrado no item (c) da mesma figura. É possível notar o formato elíptico do orifício após o desgaste.

O dobramento do arame ocorre após a passagem pelos roletes, entre estes e o tubo capilar. Tal problema, mostrado no item (d) da figura 2.17 e conhecido como *bird nest*, pode ser provocado por esforços contrários à direção de alimentação (como a fusão do arame no bico ou formação de pontos de atrito instantâneos ao longo do conduíte, tocha ou tubo capilar). Perante isto, o arame segue dobrando e enrolando em torno de si mesmo na região dos roletes, chegando ao ponto de formar algo semelhante a um ninho de passarinhos (*bird nest*).

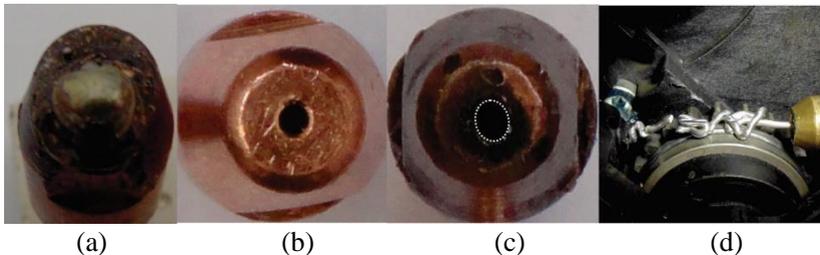


Figura 2.17 – Problemas em alimentação de arame: a) fusão do arame no bico de contato; b) bico de contato novo; c) bico de contato desgastado; d) ocorrência de *bird nest*

A dependência de bons resultados de processos de soldagem, em relação a robustez em alimentação do material de aporte, fomenta a criação de soluções novas e diversificadas. Dentro deste contexto, a busca pela minimização dos problemas relativos à alimentação de materiais impulsionou o fabricante TBI a desenvolver um mecanismo de tracionamento com características peculiares. Este mecanismo é dotado de um sistema de tracionamento chamado planetário. A Figura 2.18 apresenta uma análise esquemática deste mecanismo. No item (a) desta figura, pode-se notar que os roletes superior (RS) e inferior (RI) formam um ângulo de 90° entre si e, o eixo do arame, se dispõe a 45° em relação a ambos roletes. O mecanismo exerce a força lateral F no centro dos roletes, também representada nesta figura, formando 45° entre a face destes e, ainda, 90° com o eixo do arame. A aplicação desta força provoca o funcionamento esquematizado no item (b) da mesma figura. Pode-se observar que a força F gera duas componentes. A componente E provoca o deslocamento lateral do rolete. Já a componente R provoca o rolamento deste sobre a superfície do arame na direção indicada. Contudo, a força F foi representada apenas como um vetor tangente em um ponto de uma trajetória circular (órbita em torno do arame), para fins de simplificação. Contudo, esta força está presente em todos os pontos de uma trajetória circular descrita pelos roletes, quando todo mecanismo gira em torno do arame, ao ser acionado por um motor. Durante a rotação, a atuação simultânea das componentes de força descritas, provocam a movimentação dos roletes em trajetória helicoidal em torno do arame. Assim, o arame (que não gira) é movimentado para frente e, desta forma, ocorre a alimentação. A velocidade de arame é proporcional a velocidade orbital dos roletes. Com relação ao desempenho do tracionamento planetário, um revendedor [34] cita como principal vantagem alta dinâmica e baixa transmissão de força para o

arame. O item (c) da Figura 2.18 ilustra o cabeçote tracionador de arame modelo PF 16 do fabricante TBI.

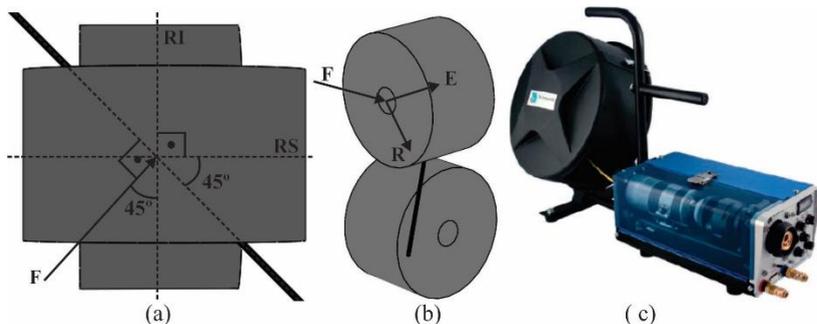


Figura 2.18 – Mecanismo de tracionamento planetário: a) disposição angular entre os elementos envolvidos; b) representação das forças que compõem o movimento planetário; c) Cabeçote Alimentador PF 16 [35]

Em busca de outras variantes de mecanismos de tracionamento com vistas à diversificação de recursos, foram realizadas pesquisas sobre outros processos industriais que manipulam fios. Tal pesquisa buscou captar novas ideias que possam conferir ganhos em eficiência e desempenho dinâmico aos sistemas de alimentação de arame para soldagem. Um dispositivo que chamou atenção é apresentado na Figura 2.19.



Figura 2.19 – Sistema de tracionamento de arame por esteiras de uma máquina de corte e conformação [4]

Observou-se que estes equipamentos utilizam um mecanismo de tracionamento por correias. Tal dispositivo, cujo funcionamento pode ser observado em vídeo disponível na *web*, mostrou uma resposta dinâmica interessante. É possível que este princípio apresente maior eficiência pelo fato de exercer pressão não somente pontual, como nos roletes, mas distribuída ao longo de um trecho do arame. A eficiência aliada à distribuição de pressão é interessante no tracionamento de arames tubulares, por motivos já abordados.

2.2.1.2 Conduítes

Com relação ao conduíte, consiste em um tubo flexível que serve como condutor do arame, entre o mecanismo de tracionamento e a tocha (MIG/MAG) ou direcionador de arame. Os principais requisitos para escolha do conduíte são comprimento do mangote da tocha, o diâmetro e o material do arame. Normalmente os conduítes podem ser fabricados em aço ou materiais poliméricos.

Os conduítes de aço são formados por um fio helicoidal. A secção transversal do fio pode ser elíptica (formando superfície de contato em pontos consecutivos) ou retangular (formando superfície de contato plana). Por serem mais resistentes ao desgaste são empregados na soldagem de arames de maior resistência mecânica, como aço comum ou inoxidáveis, em aplicações convencionais dos processos.

Os conduítes poliméricos são utilizados normalmente para realizar alimentação de arames de mais baixa resistência mecânica, como ligas de alumínio em geral. Isto porque oferecem menor atrito, o que reduz a ocorrência de dobramento destes arames. Todavia, também são empregados em alimentação de materiais de maior resistência mecânica, como aços inoxidáveis, quando o processo requer maior estabilidade de velocidade de arame. Nestes casos o conduíte tende a sofrer maior desgaste. Portanto, em função de resistência ao desgaste e eficiência no direcionamento do arame durante alimentação, existem diversos tipos de conduítes poliméricos. Os mais comuns são os conduítes de Teflon® e poliamida, que apresentam desgaste moderado e menor atrito em relação aos conduítes de aço. Quando o processo envolve alimentação de materiais de alta resistência mecânica a maiores distâncias, o conduíte CeraGlide® representa uma opção mais eficiente e resistente ao mesmo tempo. Este conduíte é constituído de Teflon impregnado com partículas cerâmicas, tornando-o mais resistente ao desgaste (em relação ao Teflon puro) com superfície deslizante. A Tabela 2.2 abaixo relaciona algumas opções de conduítes poliméricos

para soldagem com alumínio ou aço inoxidável. O fabricante TBI relaciona os diâmetros a diferentes cores nesta tabela, de acordo com os padrões comerciais.

Tabela 2.2 – Opções de conduítes para soldagem com alumínio ou aço inoxidável [36]

for aluminum and stainless steel wire	PA liners	0.8 - 1.2	anthracite	328P2040_5*
		1.2 - 1.6	anthracite	328P2347_5*
	PTFE liners	0.8 - 1.0	blue	326P1540_5*
		1.0 - 1.2	red	326P2040_5*
		1.2 - 1.6	yellow	326P2747_5*
	Carbon-PTFE liners	0.8 - 1.0	black	327P1540_5*
		1.0 - 1.2	black	327P2040_5*
		1.2 - 1.6	black	327P2747_5*
	CeraGlide with steel tip	1.0 - 1.2	bordeaux	326P2040_K*
		1.2 - 1.6	bordeaux	326P2347_K*

De acordo com [5], o atrito que ocorre entre o arame e a superfície interna do conduíte gera um efeito chamado *Stick-Slip*, já estudado em outras áreas da engenharia, em aplicações onde há deslizamento entre duas superfícies [37,38]. O *Stick-Slip* provém do fato do coeficiente de atrito dinâmico variar com a velocidade de deslizamento [38]. Este fenômeno é modelado como um sistema massa-mola, pois, o arame e o conduíte se comportam como tal. O processo de absorção de energia provoca redução da velocidade instantânea do arame seguida de rápida aceleração. Desta forma a ocorrência deste fenômeno ocasiona em paradas de alimentação seguidas de períodos de altas velocidades, perturbando o modo de transferência metálica e, com isso, a estabilidade do processo. Além se pronunciar mais com variação da velocidade de arame em sistema de alimentação dinâmica, o efeito *Stick-Slip* também é agravado pelo dobramento do conduíte [39,40].

O Powerliner® é um conduíte especial fabricado pela empresa Fronius, formado por diversos segmentos, como o da Figura 2.20 (a), conectados em série entre si (com defasagem de 90°) até alcançar o comprimento desejado. Cada segmento possui um par de pequenos roletes. Assim, tal conduíte oferece superfície de rolamento para o arame em toda sua extensão (com intervalos livres de aproximadamente 25 mm), de acordo com a ilustração da Figura 2.20 (b). Em posse de um Powerliner [5] empreenderam estudo analítico sobre o desempenho deste conduíte em relação ao *Stick-Slip*, nas variantes MIG/MAG Pulsado e CCC, ambas extremamente dependentes de velocidade de arame estável. Os resultados, plotados na forma do gráfico apresentado

na Figura 2.21 indicaram excelente desempenho no processo MIG/MAG Pulsado com uso deste conduíte, no qual foi constatada ausência de paradas de alimentação de arame, tanto em orifício de contato circular quanto estrelado. Já com o uso do conduíte de aço, a frequência de paradas pode chegar acima dos 50 Hz. Por outro lado, no processo CCC, a frequência de paradas (com qualquer dos orifícios) tende a ser maior com o uso do Powerliner, fato que se inverte com o acréscimo da velocidade de alimentação de arame. Contudo os autores reportam que, mesmo com maiores frequências de parada ao usar o Powerliner, estas se mostram mais regulares, o que, embora não represente uma condição ideal, é menos prejudicial aos processos.

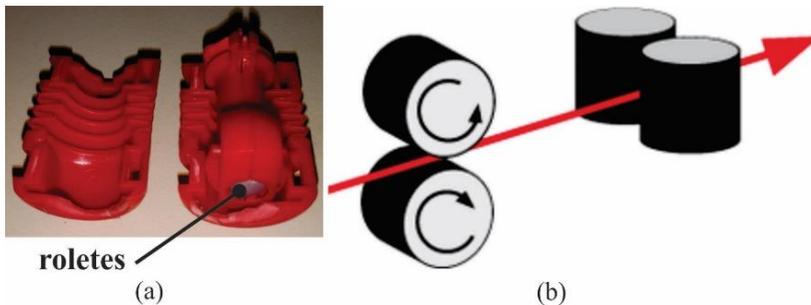


Figura 2.20 – Conduíte Powerliner: a) Segmento do Powerliner desmontado; b) Princípio de funcionamento mecânico [5]

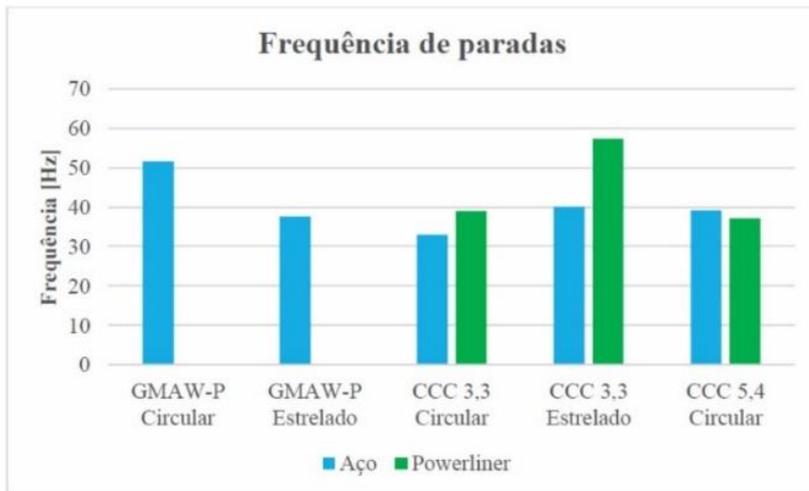


Figura 2.21 – Frequência de paradas do arame em intervalo de 300 ms [5]

O mesmo trabalho também analisa o tempo (em percentagem) que o arame permanece estático dentro de um intervalo de 300 ms. Os resultados estão expressos no gráfico da Figura 2.22. Neste quesito, enquanto os dois processos usando o conduíte de aço apresentam somas que variam de 20 a 50%, o Powerliner conferiu melhor desempenho. Com este conduíte, como já relatado, não ocorrem paradas no processo MIG/MAG Pulsado. Quanto a soma dos tempos de parada no CCC variando bicos e velocidade de arame, estas se mantêm sempre menores, não atingindo 30%.

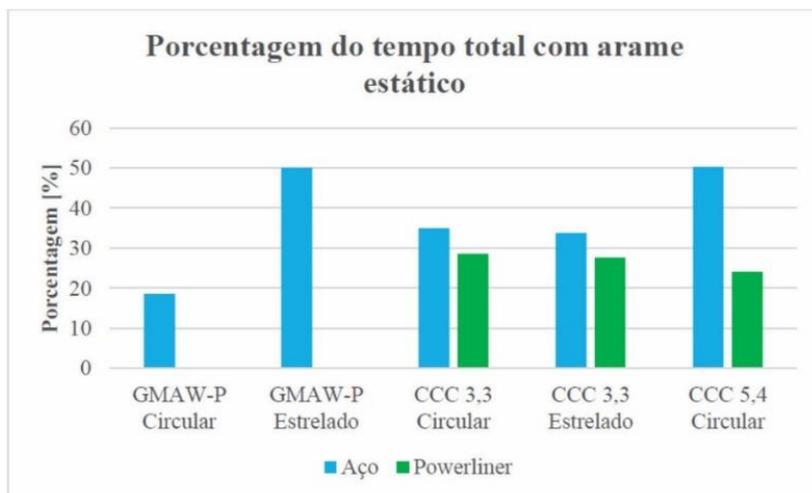


Figura 2.22 – Percentual da soma de intervalos que o arame permanece estático em período de 300 ms [5]

Em busca de aumento de produtividade em soldagem TIG orbital por meio do emprego de alimentação dinâmica, [6] enfrentou problemas relativos à contaminação do eletrodo de tungstênio. Em algumas situações, a transferência metálica não ocorria de acordo com o esperado (em ponte). Segundo este autor, a transferência intermitente ocorrida promoveu colisão entre a gota formada no arame de aço e o eletrodo. Tal fato modificou as propriedades de emissão de elétrons deste, o que resultou em união sem penetração total. A hipótese levantada responsabilizou o dobramento do conduíte pelo problema com a transferência metálica. Isto porque o autor já havia avaliado anteriormente a influência da disposição do conduíte sobre as propriedades dinâmicas da alimentação de arame, realizando os testes

apresentados na Figura 2.23. Como resultado obtive que, quanto mais curvado o conduíte, maior o tempo que o arame permanece parado entre a inversão dos movimentos de avanço e recuo. Isto pode ser visto no gráfico plotado com os dados coletados nesta experiência, apresentado na Figura 2.24. Pode-se observar que, sem curvas o tempo de parada do arame é aproximadamente a metade do tempo de parada para o caso de 180° . Assim, o autor conclui que o tempo de parada, aumentado pelo dobramento do conduíte, pode manter a extremidade do arame exposta a uma região mais quente do arco. Este acréscimo de tempo pode ser suficiente para provocar o crescimento da gota até o ponto de esta destacar por gravidade.

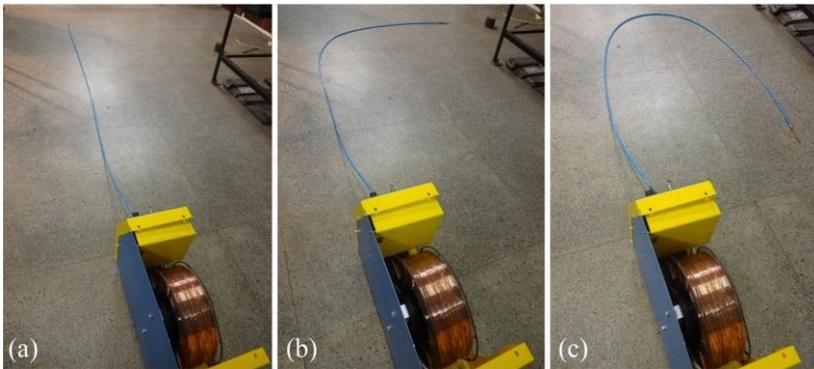


Figura 2.23 – Configurações utilizadas para estudar a influência da disposição do conduíte sobre as propriedades dinâmicas da alimentação de arame [6]: a) linha reta; b) 90° ; c) 180°

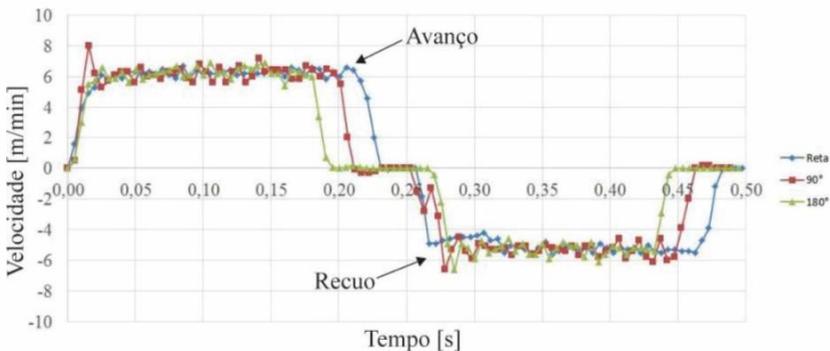


Figura 2.24 – Curvas de velocidade de arame relativas à disposição do conduíte em 2Hz [6], para linha reta, 90° e 180°

2.2.1.3 Sistemas com Tracionamento de Arame Auxiliar

Quando a operação de soldagem impõe distância acima dos padrões convencionais e exigem mobilidade da tocha de soldagem (movimentação livre do mangote e conduíte), torna-se interessante o uso de tracionadores auxiliares. Estes, chamados *Boosters*, são normalmente instalados próximos à tocha de soldagem ou ao direcionador de arame. Com auxílio estes dispositivos, é possível reduzir as perturbações aleatórias da alimentação, produzidas pelos efeitos *Stick-Slip* e escorregamentos do arame no tracionamento, agravados pela distância e variações da disposição do conduíte.

Normalmente, o uso de *Boosters* exige sincronização entre este e o tracionador do cabeçote. Deve haver compatibilidade entre as velocidades de tracionamento dos dois elementos. Assim, se o cabeçote tracionar mais rápido, a tendência é o dobramento do arame entre os tracionamentos. Por outro lado, se o *Booster* tracionar mais rápido, a porção de arame no interior do conduíte sofrerá tração. Neste caso, sem um recurso de automação, um motor elétrico gerará sobrecarga sobre o outro até o travamento do sistema.

O fabricante TBI, fornece *Boosters* juntamente com uma fonte especial (*Syntronic*). Esta fonte é capaz de monitorar constantemente a tensão elétrica do motor do cabeçote, acionando o *Booster* com tensão compatível. Todavia, como o *Booster* utiliza princípio de tracionamento planetário, um procedimento de calibração é necessário. Tal calibração é realizada para velocidades de 2,5 e 10 m/min. Consiste, basicamente, em regular valores de corrente elétrica compatíveis com o diâmetro de arame utilizado para as duas velocidades de referência. O fabricante aconselha repetir o procedimento até que os valores corretos de velocidade sejam mostrados no *display* da fonte *Syntronic*. A Figura 2.25 apresenta o mecanismo de um *Booster* e a fonte *Syntronic*.

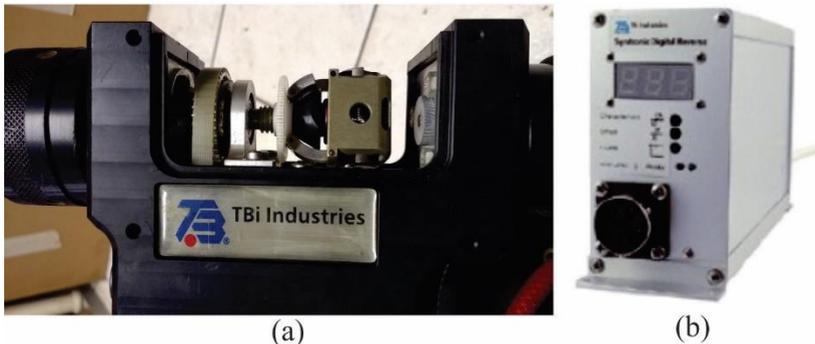


Figura 2.25 – *Booster* do fabricante TBI [41]: a) vista lateral do mecanismo planetário; b) Fonte *Syntronic*

Dentro do campo da soldagem foi identificada outra solução auxiliar para alimentação de arames. Se trata de um tracionador auxiliar pneumático de arame. Este tracionador pneumático é interessante para processos de soldagem cuja alimentação ocorre em longas distâncias. É instalado antes do cabeçote de tracionamento, próximo à bobina que, nestes casos, apresenta forma de um tambor cilíndrico. Este tracionador auxiliar é munido de um motor pneumático que aciona um mecanismo de roletes similar aos tradicionalmente empregados em cabeçotes comuns. Há também a transmissão por engrenagens e uma alavanca de pressão, como nos sistemas de alimentação de arame tradicionais. A Figura 2.26 apresenta um exemplo de aplicação deste tracionador, mostrando a localização de instalação em célula de soldagem robotizada.

Não foram encontrados artigos fornecendo informações de cunho científico sobre estes equipamentos. Contudo, o manual do fabricante, Wire Wizard, aponta vantagens que favorecem a alimentação de arames mais maleáveis como alumínio e arames tubulares. Facilidade de integração também são apontadas por não requerer sincronização automatizada qualquer entre o motor pneumático e o do cabeçote. Se a velocidade do tracionador do cabeçote variar, ou mesmo parar, não é necessário envio de sinais de sistema de controle para parar o motor auxiliar, já que este pode permanecer parado por tempo indeterminado sem ser danificado [42].

A dinâmica de alimentação também pode ser favorecida pela redução da carga do motor do tracionador do cabeçote. Outra vantagem interessante consiste na redução do atrito do arame com o conduíte que, além de prolongar a vida útil deste, favorece o desempenho dinâmico

dos alimentadores. O fabricante afirma que o tracionador pneumático mantém uma “pressão positiva” sobre o arame de modo a eliminar os pontos de contato destes com o conduíte. A Figura 2.27 ilustra este efeito da pressão positiva [43].

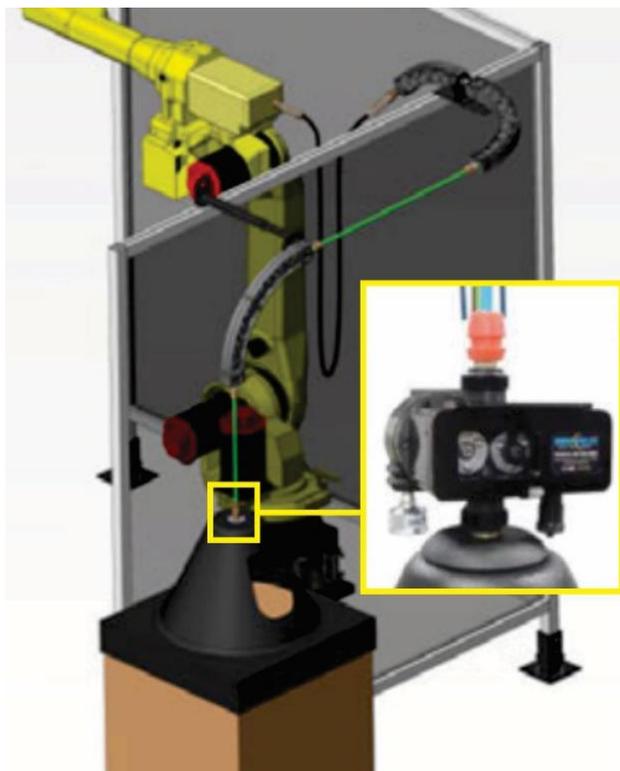


Figura 2.26 – Tracionador pneumático em detalhe com indicação de local de instalação em circuito de alimentação de arame de célula de soldagem robotizada [43]

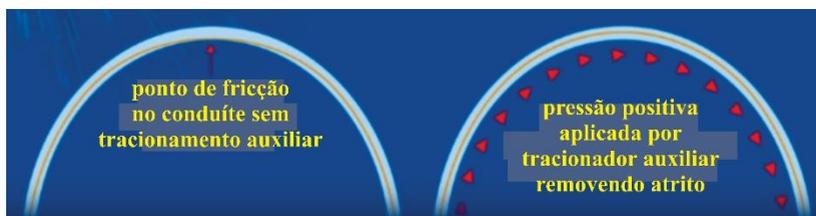


Figura 2.27 – Eliminação do atrito entre arame e conduíte pela pressão positiva aplicada pelo tracionador pneumático auxiliar [43]

2.2.1.4 Desentortadores de Arame

Como já abordado, alguns problemas de alimentação de arame são originados por deformações plásticas, às quais são submetidos durante o bobinamento. Quando se julga que estas deformações exercem efeitos nocivos sobre o processo, manifestando-se em irregularidades na alimentação ou desgaste acentuado de componentes, podem ser utilizados módulos desentortadores de arame. Cada módulo possui um conjunto de roletes que exercem pressão sobre o arame de modo a aplicar nova deformação plástica. O resultado é a remoção da curvatura no sentido da aplicação da força. Entretanto, a ação dos desentortadores tende a aumentar a carga de tracionamento do arame. Assim, quando a aplicação do processo de soldagem envolve desentortamento e longas distâncias de alimentação, torna-se necessária a utilização de *Boosters*, próximos aos módulos desentortadores (dispostos em série). A Figura 2.28 apresenta uma aplicação de desentortadores de arame (em detalhe) após um tracionador. Embora os desentortadores de arame sejam empregados em soldagem com moderada frequência, sua seleção é realizada de forma subjetiva. Não há estudos e nem dados técnicos de fabricantes que informem, de antemão, o grau de sobrecarga que podem impor aos motores de tracionamento para exercerem sua função. Desta forma, não é possível estimar os limites de sua utilização, de modo a julgar previamente a necessidade de um *Booster*, por exemplo.

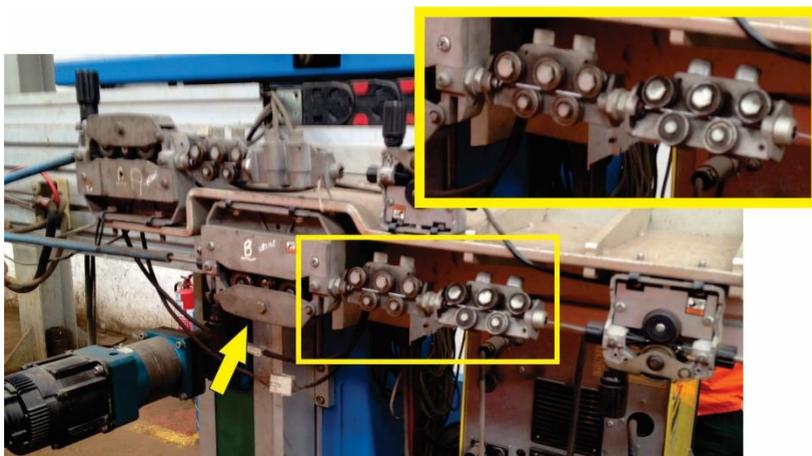


Figura 2.28 – Aplicação de desentortadores de arame (detalhe) em série com um tracionador auxiliar indicado pela seta

2.2.2 Alimentação Dinâmica de Arame em Processos de Soldagem

O LABSOLDA dispõe de diversos processos de soldagem, comerciais e experimentais. Alguns deles dependem de sistemas de alimentação capazes de adicionar o arame com velocidade variável. Tais processos serão abordados nas próximas sessões, associados às suas tecnologias de alimentação de arame. Em virtude da variedade de sistemas e seus modos peculiares de atuação, é necessário definir o termo alimentação dinâmica. Portanto, define-se alimentação dinâmica, neste trabalho, como sendo a adição de arame com variação de velocidade controlada e cíclica, cujo propósito é favorecer determinado padrão de transferência metálica com auxílio mecânico. De acordo com a duração destes ciclos, a alimentação dinâmica pode ser classificada como sendo em baixa ou alta frequência. A alimentação dinâmica em baixas frequências ocorre na faixa de pulsação de corrente usada em controle térmico dos processos, entre 0,5 e 5,0 Hz [44]. Surgiu pela necessidade de, nestas condições, variar a quantidade de material de aporte de acordo com o nível de energia, para manter o perfil de transferência metálica desejado. Já a alimentação dinâmica em altas frequências ocorre acima da faixa de pulsação de corrente para controle térmico. Nestas condições, pode ser empregada para obter padrões de transferência metálica em sincronismo com variáveis elétricas ou não.

A maioria dos sistemas de alimentação dinâmica são compostos por dois mecanismos de tracionamento sendo, de acordo com os fabricantes, um principal (mestre) e um auxiliar (escravo). Esta configuração é semelhante aos sistemas de tracionamento auxiliar, que empregam os *Boosters* para atenuação de efeitos de conduítes. Todavia, nos sistemas de alimentação dinâmica, os *Boosters* são integrados às tochas e apresentam sistema de tracionamento comum, por roletes. As tochas com estas características são chamados por fabricantes de *Push-Pull*, termos de língua inglesa que informam os sentidos de movimentação de arame que estas são capazes de executar. De forma confusa, os mesmos termos também são usados para classificar sistemas de alimentação, como no processo TOP TIG®. Neste o termo *Push-Push* é empregado para definir um sistema capaz apenas de avançar a parar o arame em sincronismo com variáveis do processo. Além de não haver consenso entre os fabricantes para o uso destes termos, sua pronúncia remete a significados opostos, pois *push* significa “empurra” e *pull* significa “puxa”. Assim, para evitar confusões neste trabalho, não será utilizado estes termos para classificação de componentes e sistemas de alimentação.

2.2.2.1 Sistemas de Alimentação Dinâmica De Arame em Baixas Frequências

Em processos de soldagem a arco é comum a utilização da técnica de corrente pulsada para exercer certo controle sobre a fluidez da poça de fusão. Principalmente quando a aplicação oferece condições para a poça escorrer (soldagem fora de posição), o uso da corrente pulsada beneficia a deposição de material, intercalando períodos de rápida solidificação com momentos de alta energia. O efeito disto é a redução do volume da poça de fusão em comparação à corrente constante, pois esta dissipa parte da energia para a peça nos períodos da base de corrente. Contudo, quando o processo é alimentado, esta técnica gera complicações para a adição de material pois, com a variação de energia, há alteração no modo de transferência [26, 45]. Muitas vezes tal problemática é contornada por parametrização, entretanto isto quase sempre reduz a robustez do processo. Assim, define-se neste trabalho a alimentação dinâmica de arame em baixas frequências como sendo a variação cíclica e controlada de velocidade de arame, em faixa de frequência utilizada em pulsação de corrente para controle térmico.

Por parte dos processos de eletrodos não consumíveis, uma variante do processo TIG, chamada Dabber TIG®, vem se destacando na literatura e na indústria estrangeiras. Neste processo, o controle do arame é realizado com a atuação de apenas um motor. Tal recurso permite o sincronismo da alimentação de arame com as variáveis elétricas do processo, por meio de comunicação entre o sistema de alimentação e a fonte de soldagem. Tipicamente, o Dabber TIG sincroniza a pulsação da corrente de arco com a adição de arame na poça de fusão.

Um ciclo nesta versão pode ser descrito em quatro etapas, de acordo com a Figura 2.29. Na Etapa 1, o sistema detecta que a fonte está impondo o pulso de corrente, e o arame avança para a poça de fusão. Na Etapa 2, o arame continua sendo comandado no sentido de avanço, em velocidade compatível com a velocidade de fusão imposta pela corrente de pulso. No Dabber TIG há inclusão do arame no interior do arco elétrico apenas nos momentos que a corrente aumenta durante o processo. Desta forma, o arame deve ser tracionado com dinâmica suficiente para acompanhar a corrente pulsada. Na Etapa 3 o sistema detecta a mudança para a corrente de base e recua o arame. Por fim, na Etapa 4, o arame é mantido em certa distância, de modo que sua extremidade permaneça na periferia do arco [46].

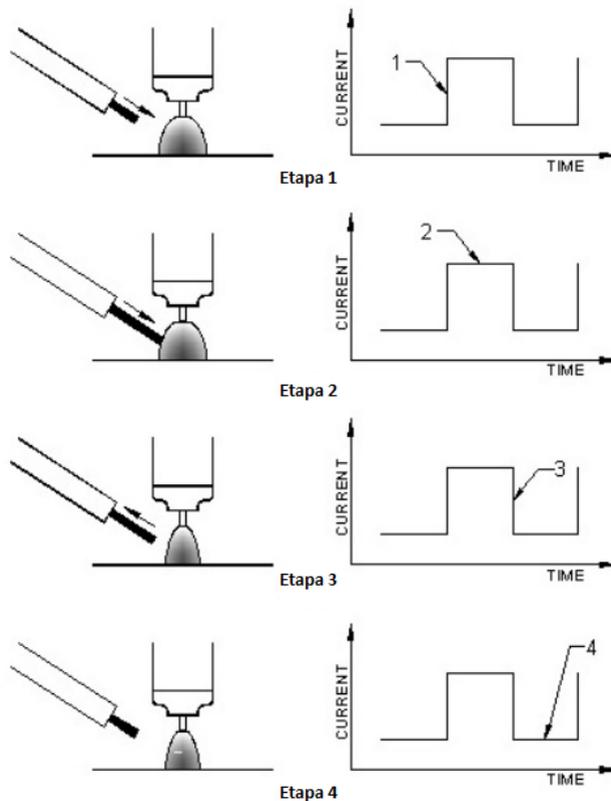


Figura 2.29 – DABBER TIG: sincronismo entre alimentação de arame e corrente pulsada [46]

Em um trabalho do LABSOLDA visando aplicação do processo TIG para passe de raiz em união de dutos [6], as variações de posição de soldagem exigiram corrente pulsada e, por consequência, houve exigência de alimentação dinâmica em baixas frequências. Embora na ocasião do trabalho o autor tenha conseguido desempenho aceitável por parte do sistema de alimentação disponível, este propôs a instalação de um tracionador auxiliar o mais próximo possível da tocha. Tal fato surge das instabilidades de transferência metálica (em função dos efeitos do conduíte), comentadas no final da sessão 2.2.1.2. A sugestão preza pelo aumento de robustez e flexibilidade do sistema de alimentação desenvolvido no trabalho.

Quando se torna necessário o máximo possível de regularidade na alimentação de arame em um processo de soldagem, busca-se sempre a atenuação dos problemas provocados pelas ações do condute. Um dos processos industriais que combatem esta problemática é uma variante do processo TIG denominada TOP TIG®, desenvolvido pela empresa Air Liquide Welding. A principal característica processual desta variante consiste, segundo [47], na injeção do arame próximo ao eletrodo, formando um ângulo de 20° . A Figura 2.30 ilustra a posição de introdução do arame em relação ao eletrodo neste processo, permitindo também comparação com a posição tradicional de adição de arame nos processos de eletrodo não consumível. Segundo [47, 48, 49], esta forma de alimentação permite melhor aproveitamento das vantagens fornecidas pela robotização da soldagem, aliadas à qualidade do processo TIG. Esta angulação entre o eletrodo e o arame tornam a tocha mais compacta (menor limitação espacial em geometrias de juntas), além de inserir o material em uma região mais quente do arco (com maior capacidade de fusão) [48,49]. Assim, são unificadas vantagens como alta qualidade (aspecto superficial e baixos índices de defeitos), ausência de respingos e velocidades de soldagem relativamente altas a custos razoáveis [48,49,50].

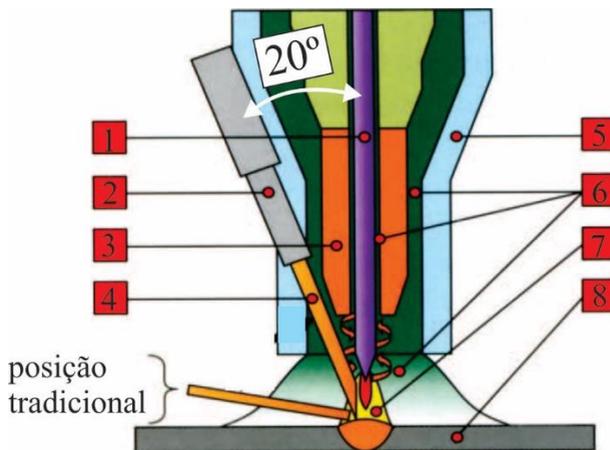


Figura 2.30 – Tocha TOP TIG: ângulo entre eletrodo e arame [48]

Altas velocidades de soldagem requerem alimentação de arame também em altas velocidades. Assim, para manter os padrões de transferência metálica estáveis nestas condições, o sistema de alimentação de material deve manipular o arame com maior

regularidade, em relação a aplicações convencionais do processo TIG. O sistema de alimentação de arame do processo TOP TIG pode realizar perfil de alimentação contínuo ou intermitente (avança e para). As possibilidades envolvem: corrente e velocidade de arame constantes; corrente pulsada e velocidade de arame constante; corrente e velocidade de arame em pulsos sincronizados, como mostra a Figura 2.31.

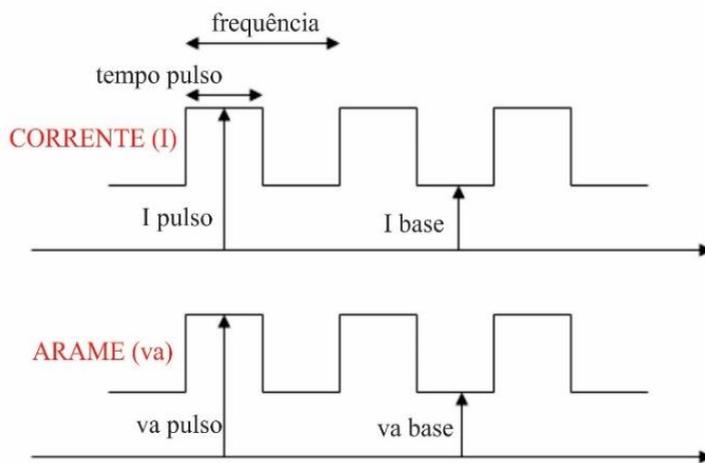


Figura 2.31 – Perfis de alimentação de arame e corrente de soldagem no processo TOP TIG [50]

Neste sistema de alimentação, o motor do cabeçote é acionado por controle de torque (nível regulado na interface do equipamento). Há também um tracionador presente na tocha, acionado por controle de velocidade. No sistema de alimentação de arame do processo TOP TIG, o fabricante [50] classifica o motor do cabeçote como escravo e o motor da tocha como mestre. Esta tecnologia confere características de alimentação apropriadas ao processo, permitindo as interações com a corrente de soldagem de acordo com a Figura 2.32. Nesta figura, a corrente e velocidade de arame em regime são representadas constantes para simplificação, podendo apresentarem perfil de acordo com a Figura 2.31. Entretanto, este sistema não é capaz de realizar o recuo do arame em regime de alimentação dinâmica. O único momento em que o arame recua é no fim da soldagem, como mostrado na Figura 2.32. Tal movimento, atuando simultaneamente com um *delay* na queda da corrente de regime evita que, ao fim do processo, a poça se solidifique com o arame em seu interior.

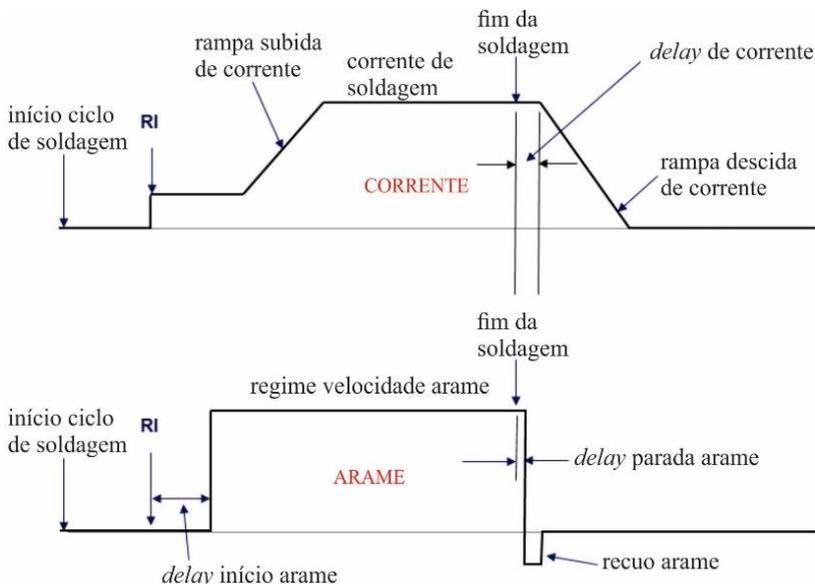


Figura 2.32 – Sistema de alimentação do processo TOP TIG: a) mecanismo de tracionamento do cabeçote alimentador; b) potenciômetro de regulagem de torque; c) mecanismo de tracionamento da tocha [50]

A alimentação dinâmica de arame em baixas frequências em processos de eletrodos consumíveis é empregada pela variante MIG/MAG Pulsado com Pulsção Térmica®, desenvolvida no LABSOLDA [3]. Tal processo adequou o emprego do MIG/MAG Pulsado para a recuperação de pás de turbinas hidráulicas (soldagem fora de posição), utilizando a pulsção de energia também em baixa frequência para controle térmico da poça (fora de posição). Assim, este processo emprega a pulsção de corrente em alta frequência necessária a transferência metálica no processo MIG/MAG Pulsado e, simultaneamente, exige a variação da corrente média em baixas frequências. A Figura 2.33 associa as formas de onda de corrente com a o perfil de velocidade de arame necessário, relacionando-os a aspectos de fusão do processo.

Em termos de alimentação dinâmica, neste caso, o arame deve estar sempre sendo avançado e, ainda, com velocidades diferentes na base térmica e no pulso térmico. A forma de onda de velocidade de arame requerida por este processo possui (desprezando as rampas de aceleração e desaceleração) o mesmo formato da representação da corrente média, em traço-ponto na Figura 2.33. Na ocasião deste

trabalho [3], foi necessário reduzir o tempo de resposta do alimentador para aproximadamente 100 ms, buscando evitar curtos-circuitos e variações de comprimento de arco no processo. Tal dinâmica foi conseguida por alterações no sistema de controle do equipamento. Em laboratório utiliza-se, por vezes, roletes ranhurados para alimentação de arames maciços no Pulsado Térmico, pois, nota-se que isto também confere melhor desempenho dinâmico ao alimentador. Entretanto, os danos provocados por desgaste de componentes do sistema de alimentação e tocha, já abordados anteriormente, também evoluem com rapidez.

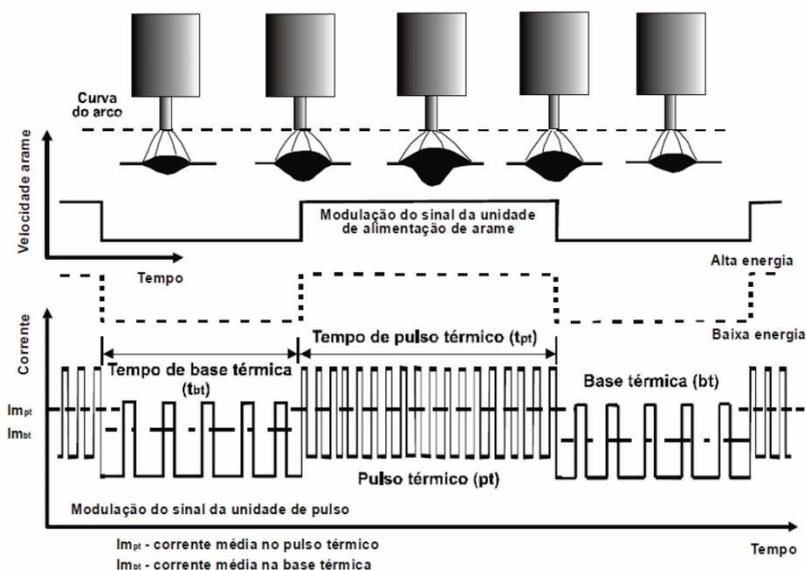


Figura 2.33 – Perfis de onda de corrente e velocidade de arame relacionados a propriedades de fusão no processo MIG/MAG Pulsado com Pulsção Térmica [51]

2.2.2.2 Sistemas de Alimentação Dinâmica de Arame em Altas Frequências

Em processos de soldagem a arco com eletrodo não consumível, a alimentação dinâmica em altas frequências vem sendo empregada na indústria em um processo com nome comercial TIP TIG®. Tal variante foi apresentada como uma solução em equipamento mais simples e econômica comparada a processos como o Tandem MIG e LASER

Híbrido, conferindo resultados além das expectativas para o processo TIG em termos de produtividade [52]. O mesmo autor acrescenta que esta técnica de alimentação de arame pode ser também aplicada em outros processos, como Plasma e LASER, para soldagem de vários materiais.

A variante TIP TIG baseia-se em uma alimentação de arame com velocidade oscilatória, sem qualquer sincronismo com outras variáveis do processo. O arame é enviado à poça de fusão com o movimento descrito em frequências próximas a 20 Hz e amplitudes em torno de 10 mm [10]. Um fabricante [53] afirma que a transferência metálica nestas condições de movimento provoca uma agitação mecânica no material fundido de modo a expulsar gases e forçar seu espalhamento. Assim, a formação do cordão de solda não fica dependente somente da tensão superficial, tendendo este a apresentar maior tolerância geométrica de chanfros e porosidade reduzida. O fabricante aponta, inúmeras outras vantagens processuais e metalúrgicas relacionadas à agitação da poça.

A movimentação anteriormente descrita é conseguida por meio de um sistema de alimentação de arame especial, apresentado na Figura 2.34. A estrutura em que se encontram os roletes é movimentada para frente e para trás ao longo de uma guia, conforme ilustra a Figura 2.34 (a). Um mecanismo biela-manivela acionado por um motor elétrico, mostrado na Figura 2.34 (b) provoca este efeito.

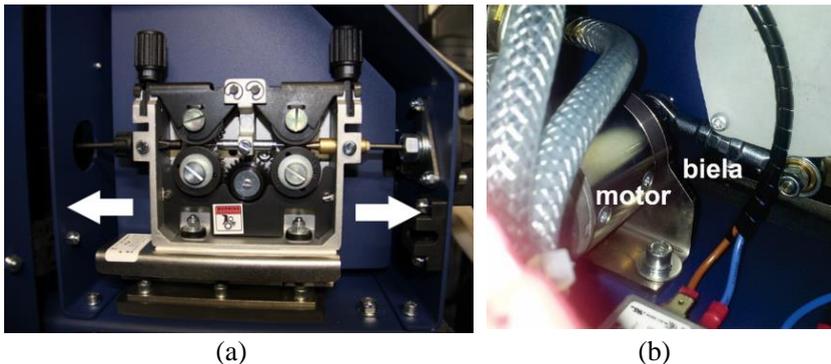


Figura 2.34 – Sistema de alimentação de arame TIP TIG: a) mecanismo de tracionamento por roletes sobre a guia de movimentação; b) mecanismo biela-manivela

O trabalho de [10] apresenta filmagens em alta velocidade cujo foco é a região de transferência metálica do arame para a poça de fusão. Mesmo usando uma baixa velocidade de alimentação constante de

arame (1,5 m/min), em comparação aos valores máximos de oscilação (mais ou menos 35 m/min), foi observado que o arame não recua em nenhum momento. Tal fato é inesperado pois, teoricamente, enquanto a velocidade de alimentação constante for menor que as máximas de oscilação, deve haver recuo. Ao realizar filmagem na região do arame próxima aos roletes nas mesmas condições, observou-se recuo. O autor atribuiu então tal problema a fatores como o comprimento e disposição do conduíte, já que o problema ocorre após os roletes. A Figura 2.35 apresenta imagens da filmagem em alta velocidade realizada por [10], sendo a Figura 2.35 (a) junto à poça de fusão e a Figura 2.35 (b) próximo aos roletes.

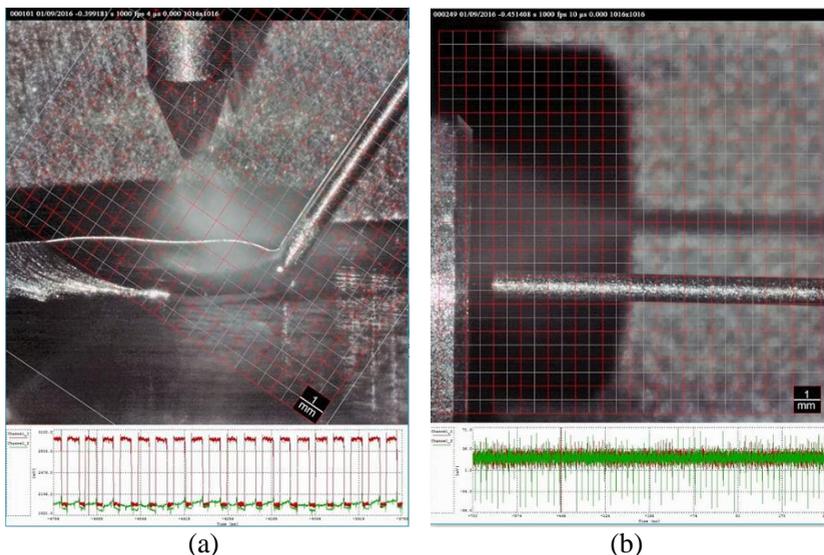


Figura 2.35 – Filmagem em alta velocidade [10]: a) arame junto à poça de fusão; b) arame próximo aos roletes.

Outro trabalho [9], empregando o mesmo equipamento TIP TIG, evidenciou que a adoção da alimentação dinâmica em alta frequência proporcionou o aumento de robustez do processo TIG. Redução de discontinuidades ao longo da junta, além de redução de contaminação do eletrodo foram os principais benefícios observados. O autor atribui estes resultados às altas velocidades instantâneas de avanço. Afirma que o metal de adição percorre as isoterms do arco mais rapidamente até o contato com a poça de fusão, instante em que uma pequena porção da extremidade funde e é entregue à poça. A alta velocidade evita a

formação de gotas grandes, que podem vir a contaminar o eletrodo. Tal fenômeno repete-se para corrente pulsada e constante. Entretanto este autor conseguiu, tomando cuidado com a disposição do conduíte, o movimento de avanço e recuo, conforme deve ocorrer no processo TIP TIG. A Figura 2.36 apresenta uma sequência de imagens que indicam o movimento de avanço e recuo obtido. Nota-se, no primeiro quadro, que o arame entra ainda sólido na poça de fusão. Na sequência, forma-se uma ponte metálica, rompida pelo movimento de recuo no último quadro.

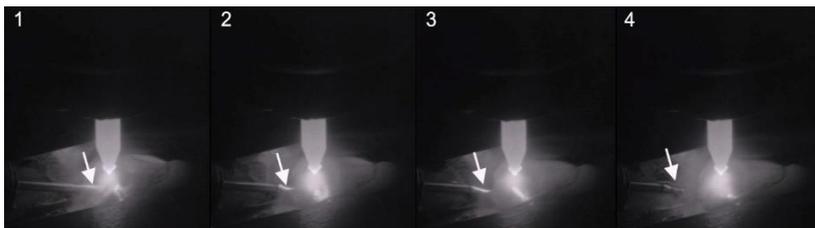


Figura 2.36 – Monitoramento de processo TIP TIG com movimento de avanço e recuo do arame [9]

Com relação à alimentação dinâmica de arame em altas frequências em processos de soldagem a arco com eletrodos consumíveis (leia-se MIG/MAG), está relacionada fundamentalmente com as condições de transferência metálica. A alimentação dinâmica, nestes casos, atua em sincronismo com variáveis elétricas do processo para promover o destacamento das gotas metálicas na transferência por curto-circuito. Algumas empresas já atendem a indústria com processos baseados em atuação mecânica na transferência metálica, contudo, a versão MIG/MAG Cold Metal Transfer (CMT) da empresa FRONIUS, se destaca como, pode-se dizer, a versão mais utilizada na indústria até o momento.

No MIG/MAG Curto-Circuito Convencional as gotas se transferem por tensão superficial ao entrar em contato com a poça de fusão. A consequência disto é a reabertura do arco em elevados patamares de corrente, deixando o processo impróprio para aplicações mais sensíveis. Os sistemas de alimentação dinâmica, nestes casos, são capazes de operar nas frequências em que ocorre a transferência por curto-circuito, que podem chegar em torno dos 70 Hz [54]. Estes equipamentos são capazes de manipular o arame de acordo com a sequência ilustrada na Figura 2.37. Na fase de arco a extremidade do arame é avançada, até o contato da gota formada com a poça de fusão.

Após isto o sistema promove o retorno do arame, destacando a gota com auxílio mecânico. Neste processo, os consequentes picos de corrente podem ser controlados pela fonte de soldagem, permitindo a redução de energia, já que a corrente não é a única responsável pelo destacamento da gota. Além do baixo aporte térmico, também pode conferir baixos níveis de respingos e boa capacidade de controle de diluição, se comparado ao MIG Pulsado, por exemplo. Tais versões vêm conferindo versatilidade ao processo MIG/MAG, viabilizando sua aplicação em união de chapas finas [55], passe de raiz [7,56,57], revestimentos [58,59] e soldagem de materiais dissimilares (como alumínio e aço) [60,61,62].

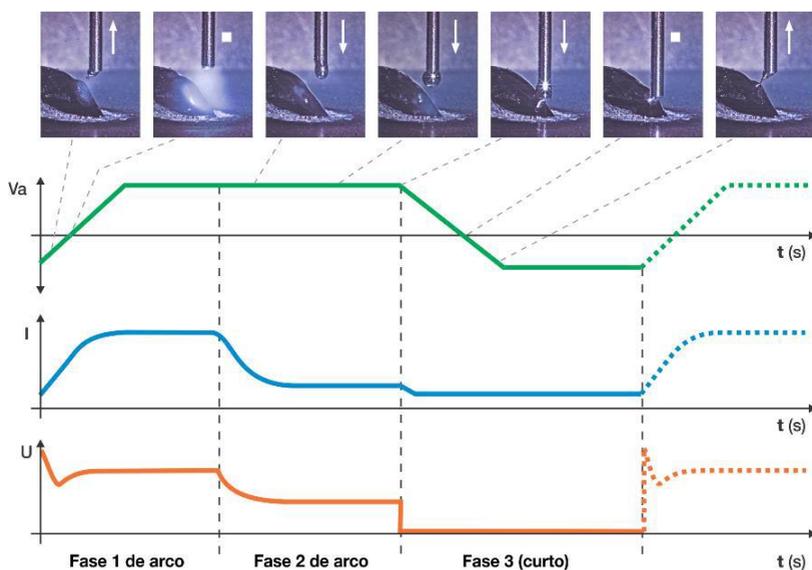


Figura 2.37 – Sincronismo entre variáveis elétricas e velocidade de arame durante transferência metálica no processo CMT [63]

A Figura 2.38 apresenta um esquema básico do sistema de soldagem CMT. Este esquema ilustra a interação entre a corrente de soldagem e o sistema de alimentação de arame, neste caso composto por dois tracionadores. O tracionador do cabeçote alimenta o arame à uma velocidade média. Já o movimento de avanço e recuo do arame é realizado por um tracionador localizado na tocha de soldagem.

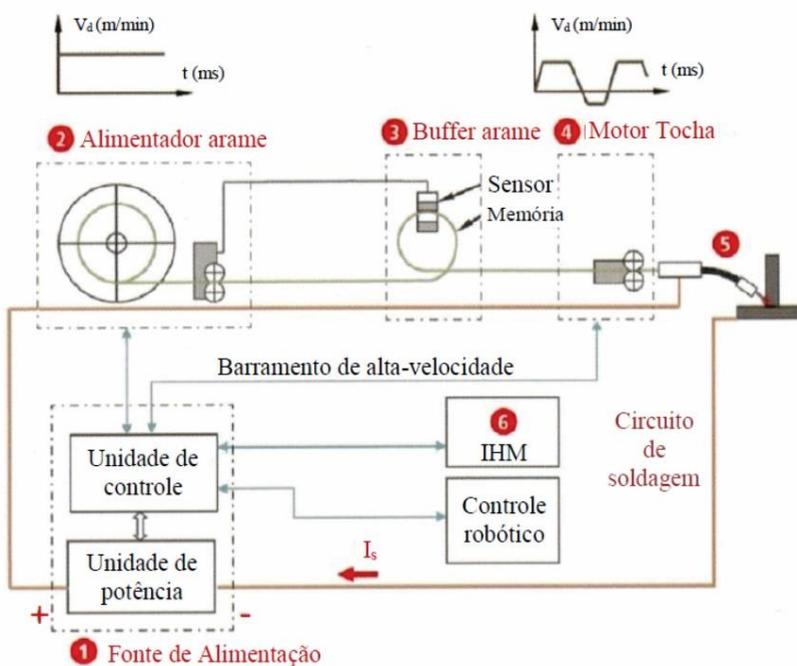


Figura 2.38 – Esquema básico do sistema de soldagem CMT [51]

O controle aciona o motor da tocha de forma a realizar recuo e avanço do arame de acordo com a Figura 2.37, além de acionar o motor do cabeçote de forma constante, em velocidade média compatível com a velocidade do motor da tocha. Entre os tracionadores, há uma distância média ao longo do conduíte, há um dispositivo chamado *Buffer* ou pulmão. Este dispositivo fornece espaço para que o arame tenha certa liberdade de movimento, necessária ao avanço e recuo. O segmento do conduíte interno ao *Buffer* está preso à uma alavanca (ligada, por sua vez, a um sensor integrado ao sistema de controle), a qual se movimenta quando há diferença entre o consumo do processo e a velocidade de arame imposta pelo cabeçote. A Figura 2.39 apresenta aspectos do tracionador da tocha, do *Buffer* e da interação entre conduíte e alavanca. De fato, o consumo do arame pelo processo pode mudar durante variação de distância entre tocha e peça, por exemplo [51]. Isto faz com que, em primeiro momento, a alavanca se mova em direção ao excesso ou à falta de arame. Assim, o sensor alimenta o controle que, por sua vez, reajusta a velocidade do cabeçote até que a alavanca assuma posição de referência.

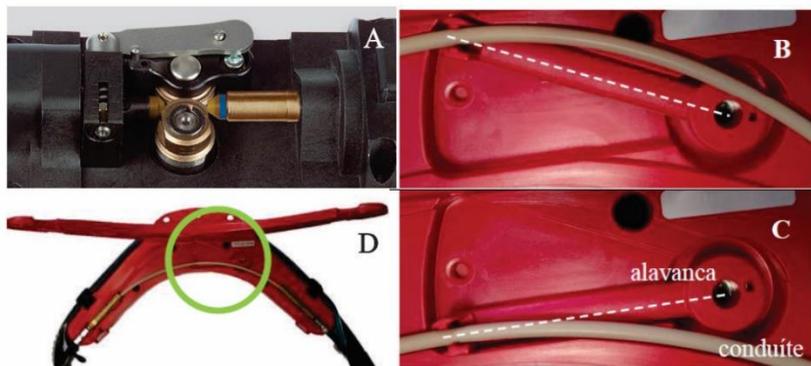


Figura 2.39 – Componentes do sistema de alimentação de arame CMT Fronius, adaptado de [51]: a) Tracionador da tocha; b) posição da alavanca com excesso de arame; c) posição da alavanca com falta de arame; d) Indicação da alavanca no *Buffer*

Embora este sistema tenha apresentado desempenho satisfatório em termos de eficiência e robustez em atividades de pesquisa empreendidas no LABSOLDA, o equipamento não permite flexibilidade suficiente para expansão de conhecimento científico. A busca pela devida liberdade de pesquisa acerca desta variante do processo MIG/MAG culminou em desenvolvimento de um protótipo de sistema de alimentação dinâmica de arame para altas frequências [11,51]. Por motivos de simplificação, o sistema de alimentação de arame, desenvolvido nestes trabalhos para investigação dos fenômenos envolvidos no processo MIG/MAG AD (Alimentação Dinâmica), apresenta a estrutura mostrada na Figura 2.40.

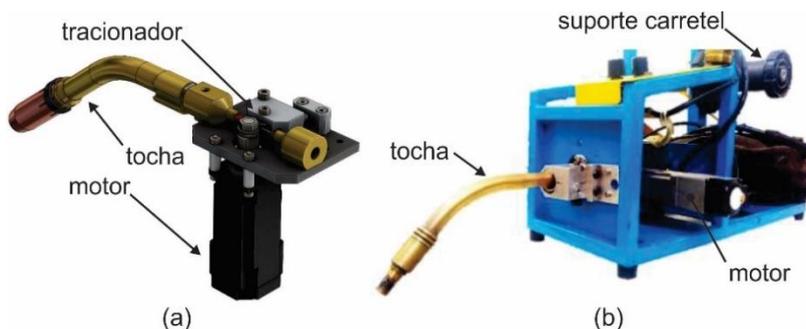


Figura 2.40 – Protótipo desenvolvido para estudo do processo MIG/MAG AD [51]: a) tocha com tracionador; b) tocha com tracionador integrada diretamente a um cabeçote alimentador de arame

As simplificações deste protótipo favoreceram os estudos acerca da influência da alimentação dinâmica de arame sobre a transferência metálica e características de cordões de solda resultantes. Entretanto, foi necessário desenvolver uma tocha com mecanismo de tracionamento integrado e acoplá-la diretamente a um cabeçote alimentador. Este protótipo permitiu as propriedades de alimentação dinâmica requeridas pelos estudos. Contudo, não foi implementado um *Buffer*, de modo que o sistema não realimenta a velocidade do motor do cabeçote. Este protótipo, então, opera com um conduíte cortado ao meio. Assim, quando o operador observa a sobra de arame na região sem conduíte, este reduz a velocidade de alimentação do cabeçote durante o processo.

2.2.3 Sistemas de Alimentação de Pó

Como já comentado anteriormente, existem diversos processos de soldagem que utilizam material de aporte em forma de pó. Os mais expressivos consistem em versões dos processos Plasma e LASER. A Figura 2.41 ilustra aspectos operacionais destes processos.

A soldagem a LASER vem ampliando rapidamente seu campo de aplicação na indústria, fator que tem impulsionado também a pesquisa científica para aprimoramento desta tecnologia. Algumas das maiores aplicações da soldagem LASER envolvem união e revestimento (LASER *Cladding*). Neste último caso, são citadas vantagens em aspectos metalúrgicos como depósitos de baixa diluição, microestrutura de grãos refinados, continuidade metalúrgicas de alta qualidade entre depósitos e camadas [64, 65, 66]. Vantagens a nível de processo também são apontadas pelos mesmos, como maior controle de penetração, maior controle de reforço (redução de esmerilhamento), alta estabilidade e reprodutibilidade, alta qualidade superficial de depósitos. Recentemente, a técnica de fabricação de peças por manufatura aditiva, vem sendo aprimorada, incentivando ainda mais o desenvolvimento de recursos para este processo. Uma das maiores frentes de pesquisa se concentra na alimentação de pó no processo LASER. Alguns artigos vêm apresentando desenvolvimentos de bocais de alimentação [67,68]. Tais componentes visam otimização de propriedades da solda frente a determinadas aplicações.

Quanto ao processo Plasma, uma variante, conhecida nacionalmente como Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó (PTA-P), vem sendo empregada industrialmente para produção de revestimentos metálicos. Em comparação a outros processos de soldagem a arco, permite maior controle sobre diluição e apresenta

depósitos de alta qualidade superficial, o que pode reduzir retrabalho para acabamento entre outras vantagens [69,70]. Além disto, uma aplicação peculiar do PTAP consiste no desenvolvimento de novas ligas, em instituições de pesquisa [13,14]. A utilização do material de aporte na forma de pó permite a fusão de misturas experimentais, compostas por diversos materiais em suas devidas proporções, de modo a obter ligas metálicas como resultado de soldagem.

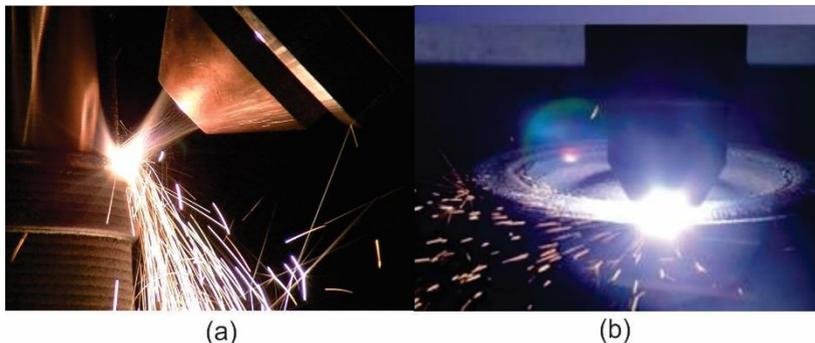


Figura 2.41 – Processos alimentados com pó: a) PTA-P; b) LASER *Cladding*

A alimentação do material de adição em forma de pó nestes processos de soldagem é realizada por um Alimentador de Pó, ou ADP. Basicamente, os mesmos equipamentos atendem aos dois processos. São constituídos de um reservatório (silo) e de um mecanismo de dosagem que, quando acionado por um motor, transfere as partículas de pó do seu reservatório para uma mangueira onde flui um gás, chamado gás de arraste. Tal gás transporta as partículas do interior do alimentador para a poça de fusão. O LABSOLDA empreende pesquisas sobre o processo PTA-P, realizando desenvolvimentos sobre alguns tipos de alimentadores, que serão abordados a seguir.

Em virtude de problemas concernentes à alimentação de pó por parte de um ADP de Fuso que integrava a bancada PTA-P do LABSOLDA [12,15], foi adquirido um alimentador disponível comercialmente cujo princípio mecânico se baseia em um disco vertical. Neste equipamento, detalhado na Figura 2.42, o disco possui função de deslocar uma pequena pilha de pó que se forma continuamente sobre este ao cair do reservatório. O material deslocado cai sobre um funil no qual está conectada a linha de transporte pneumático, sendo direcionado para a tocha de soldagem pelo gás de arraste. Este ADP conferiu boas condições na alimentação de pós tradicionais. Por outro lado, na

manipulação de pós não convencionais foi observada tendência a entupimentos frequentes (formação de arco). Se forçado a manipular tais materiais (por meio de vibrações), era formado caminho de rato, como mostrado na Figura 2.43. Tais fenômenos, caracterizam desempenho ineficiente deste ADP na manipulação destes materiais.

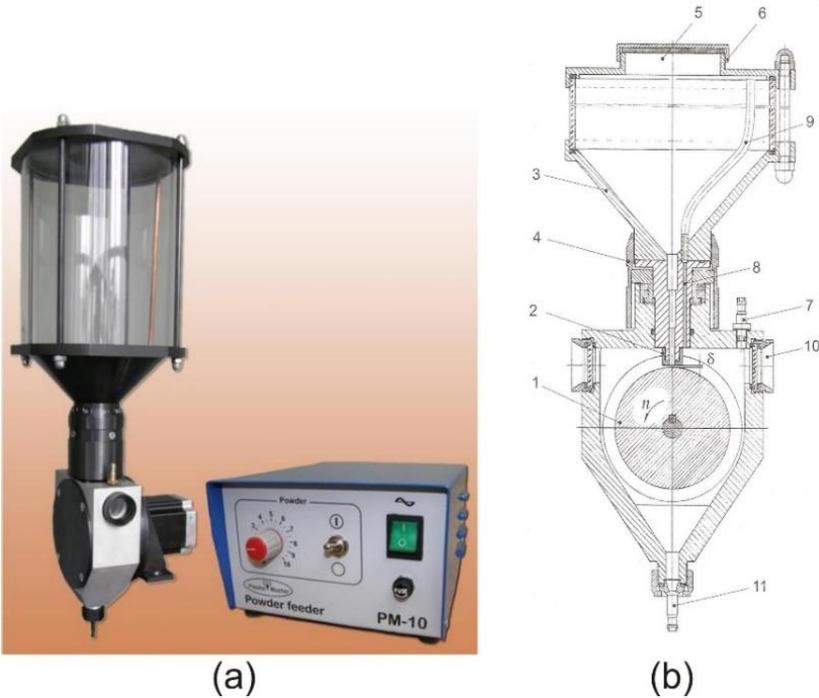


Figura 2.42 – ADP de disco vertical: a) produto comercial e seu gabinete de controle [71]; b) estrutura em corte frontal. Principais itens: 1- disco vertical; 3- base do silo; 11- conexão com linha pneumática [72]

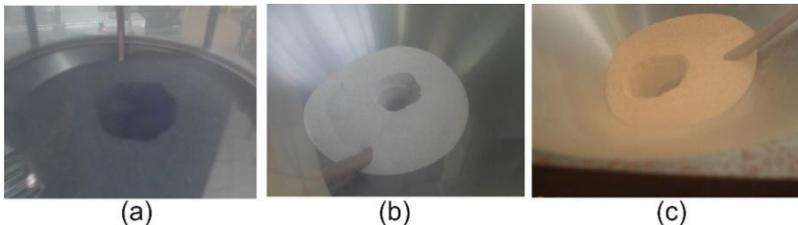


Figura 2.43 – Defeito de escoamento de caminho de rato [15]: a) Pó Fe-Ni Triturado; b) Inox 316L (+45-90 μm); c) Bronze (+40-200 μm)

O LABSOLDA também obteve acesso a um ADP do tipo disco horizontal. Tal equipamento, gentilmente cedido pelo LMP foi adquirido por este laboratório para realizar alimentação de pó em processo LASER. Como representado no esquema da Figura 2.44, neste equipamento o pó contido no silo cai sobre um rebaixo circular concêntrico presente no disco. A pilha de pó é limitada lateralmente e na parte traseira por uma peça de material polimérico (limitador de dose). Com a rotação do disco, o pó é deslocado lateralmente apenas dentro do rebaixo de forma constante. Ao chegar em um ângulo próximo a 180° de giro, o pó contido no rebaixo encontra outra peça (direcionador de partículas) que obstrui a passagem das partículas, desviando-as para a entrada da mangueira de transporte pneumático, cuja entrada se situa logo acima desta peça.

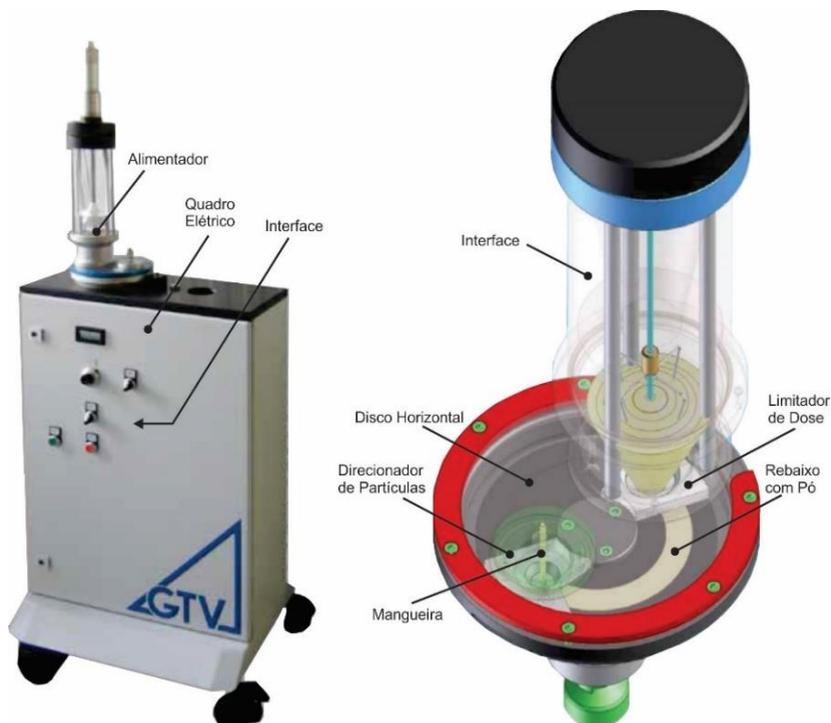


Figura 2.44 – Alimentador de pó tipo Disco horizontal [73]

Frente aos testes o equipamento apresentou característica de repetitividade e reprodutibilidade satisfatórias, em função da rotação do disco e da remontagem do equipamento após limpeza, respectivamente

[74]. Contudo foram observados aspectos negativos, como mostra a Figura 2.45. Primeiramente, observou-se por simples análise visual a formação de um anel de partículas escuras na periferia da região movimentada pelo agitador, mostrado na Figura 2.45 (a). Isto aponta para tendência à segregação de misturas, muitas vezes empregadas para obtenção de ligas especiais via soldagem. Durante a desmontagem do equipamento para limpeza, o Limitador de Dose e o Limitador de Curso forma examinados. Os ressaltos da parte inferior destas peças que se encaixam ao rebaixo do disco sofreram alguns arranhões, como mostrado nas Figuras 2.45 (b) e (c). Acredita-se que algumas partículas devem passar por baixo dos ressaltos e, com a pressão, ocorre desgaste por atrito. Desta forma, estas peças devem ser substituídas quando desgastadas, mas, enquanto isso, devem ser realizados testes para monitoramento da taxa mássica.

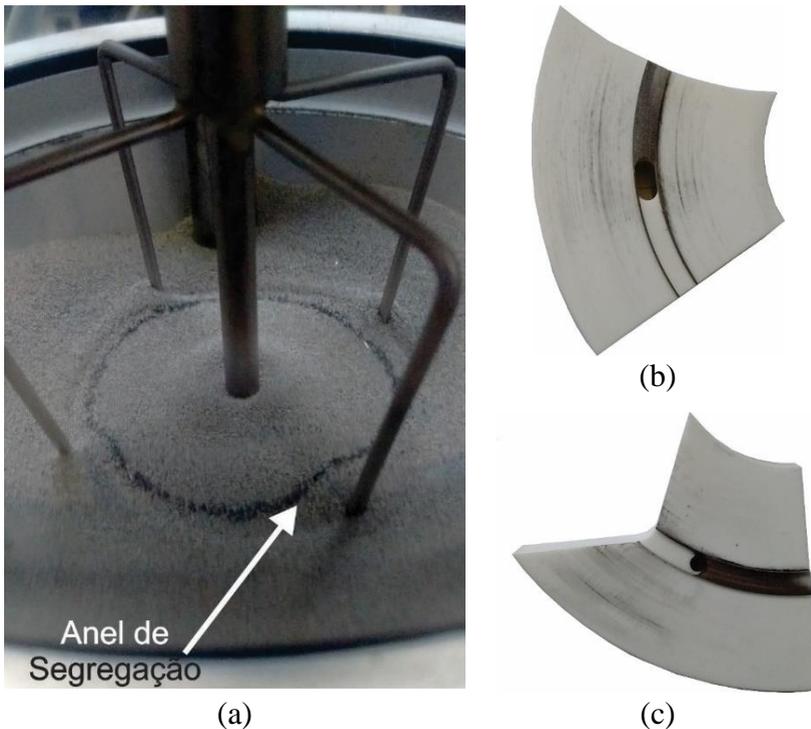


Figura 2.45 – ADP de disco horizontal: a) segregação de partículas formando anel escuro; b) desgaste do limitador de dose; c) desgaste do direcionador de partículas

Devido às deficiências apresentadas pelos alimentadores analisados (alimentação intermitente, defeitos de escoamento e segregação de misturas), foi concebido um novo sistema de alimentação de pó no LABSOLDA, chamado de VR-F (Válvula Rotativa e Fluidizador). Apresentado na Figura 2.46, este equipamento foi concebido para manipular pós de diferentes morfologias e faixas granulométricas, viabilizando a alimentação do processo PTA-P com misturas experimentais durante desenvolvimento de liga resistente à cavitação. Também deveria oferecer robustez na alimentação em soldagem fora de posição [14,15]. Como pode se constatar na Figura 2.46, este equipamento é composto principalmente por um silo (como reservatório de pó), uma válvula rotativa (dosagem de vazão volumétrica de pó) e um componente chamado Fluidizador (amortecimento de perturbações e condicionamento para alimentação em oposição à gravidade [14,15]).

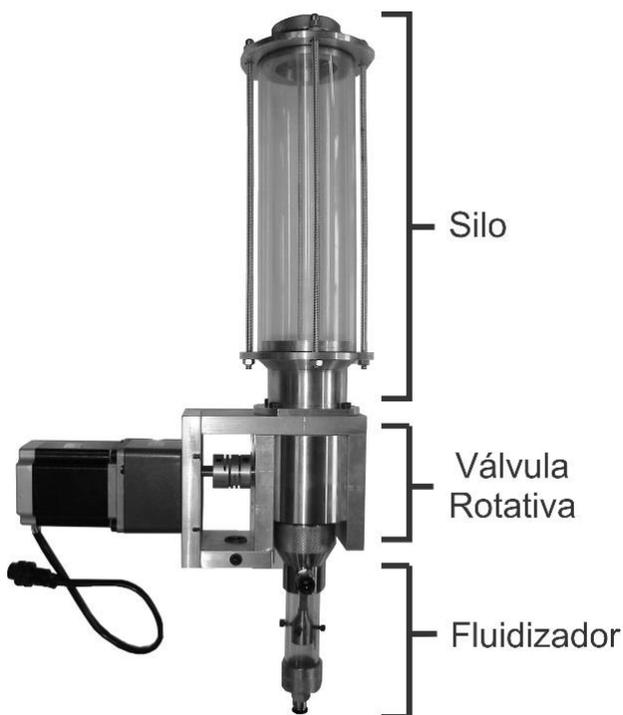


Figura 2.46 – ADP VR-F com principais componentes [14]

2.2.3.1 Mecanismo de Dosagem de Válvula Rotativa

Uma Válvula Rotativa é semelhante ao Disco Vertical, contudo, apresenta cavidades e vedação, como mostrado na Figura 2.47. A vedação, na Figura 2.47 (b), conferiu certa independência entre as dimensões da válvula e o canal de descarga do Silo. Embora um material resistente ao desgaste tenha sido usado, partículas de pó de superfície escarpada mantinham-se aderidas. A sucessão deste fenômeno culminava em formação de camada de pó entre as partes em movimento relativo, aumentando a carga de forma imprevisível. Assim, o rompimento do acoplamento entre o motor e a válvula ocorria com frequência e, quando não se rompia, a caixa de redução do motor era danificada. Tal problema vem impedindo que este equipamento represente uma alternativa para alimentação de pó em processos de soldagem.

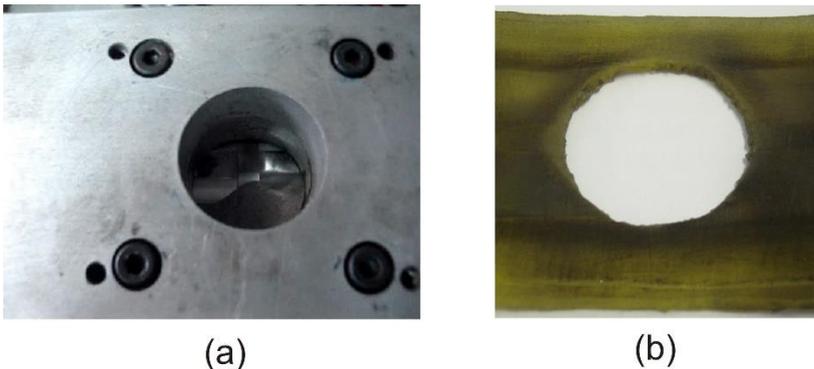


Figura 2.47 – Válvula rotativa: a) vista superior durante manipulação de pó; b) superfície da vedação com partículas incrustadas

2.2.3.2 Sensor de Vazão Mássica de Pó

Como qualquer outra variável, ou parâmetro, há necessidade de medir a quantidade de material aportado em determinado intervalo de tempo, durante os processos de soldagem. Um dos principais papéis da medição consiste na disponibilização de um valor que indique uma noção quantitativa do mensurando, em relação a uma unidade de medida. A medição de velocidade de arame, por exemplo, é realizada por um sensor (encoder) que permite obtenção de um valor em m/min. Conhecer a taxa de alimentação do processo de soldagem é

fundamental, pois, deve ser usada para repetição de resultados, independentemente do tipo de equipamento empregado. Outro papel da medição, fundamental para o desenvolvimento tecnológico dos processos de soldagem, consiste no monitoramento das variáveis durante o processo. Um dos benefícios de monitorar a variável é a atuação sobre esta por meio de controle (malha fechada). Tal recurso é essencial para conceder alto grau de reprodutibilidade de resultados. Outro benefício se trata do monitoramento simultâneo de diversas variáveis do processo. Sistemas de aquisição para soldagem permitem, deste modo, acompanhamento do comportamento gráfico das variáveis, permitindo associá-las com aspectos de depósitos de soldagem, sejam características positivas ou negativas (defeitos).

Os equipamentos de alimentação de pó existentes que integram sistemas de soldagem PTA-P ou LASER, não contam com um sensor que meça a taxa mássica de alimentação dos processos. Não há disponível um sensor com características de portabilidade e sensibilidade compatíveis com a forma como o pó é alimentado nestes processos de soldagem. A vazão mássica tem sido estimada por meio de pesagem. Este método, além de não poder ser aplicado durante o processo, permite levantamento de curvas de calibração que podem ser modificadas quando o equipamento conta com peças de reposição. Desta forma, a reprodutibilidade e o desenvolvimento dos processos vem sendo limitada pela dificuldade em controlar e associar os resultados de soldagem com o comportamento da taxa mássica. Pelo mesmo motivo, torna-se difícil caracterizar o comportamento dinâmico dos sistemas de alimentação, dificultando a seleção de um ADP em função das características do processo de soldagem.

Os equipamentos dos processos de soldagem que utilizam pó como material de adição utilizam, geralmente, o método de transporte pneumático para enviar as partículas ao arco elétrico. Tal método gera energia eletrostática em virtude do atrito entre as partículas e entre elas e os componentes dos alimentadores com os quais entram em contato. A observação deste fenômeno na bancada do processo PTA-P do LABSOLDA instigou a execução de testes investigatórios sobre a possibilidade de utilizar tal fenômeno como sensor de fluxo de pó no referido processo [12]. A primeira tentativa consistiu em um capacitor composto por duas lâminas de cobre, uma em cada lado da mangueira de transporte pneumático. Contudo, o aparato não produziu sinal representativo da vazão de pó. Na segunda tentativa, o protótipo era formado por dois tubos de cobre em série, cada um conectado a um polo de uma fonte de corrente. Com este aparato, buscou-se a produção de

um sinal proporcional ao fluxo de pó pela eletrificação das partículas no primeiro tubo e posterior descarga sobre o segundo (gerando uma corrente elétrica entre eles). Neste caso, embora tenha-se obtido um sinal de corrente influenciado pela vazão de pó, interferências como ruídos provenientes da rede elétrica e mesmo a presença das mãos do operador comprometeram a adoção deste protótipo para estudos. A constatação de que o sinal de resposta era similar mesmo sem alimentar o protótipo com fonte de corrente, levou à terceira tentativa. Desta vez, como mostrado na Figura 2.48, os tubos empregados eram constituídos de polímero impregnado com partículas condutoras. A intenção era manter a condutividade destes sem que os mesmos pudessem funcionar como antenas (inibindo a influência de agentes externos). Com este protótipo obteve-se a geração de um sinal representativo do fluxo de pó, contudo houve saturação prematura da corrente, o que modificou a correlação entre as grandezas envolvidas.

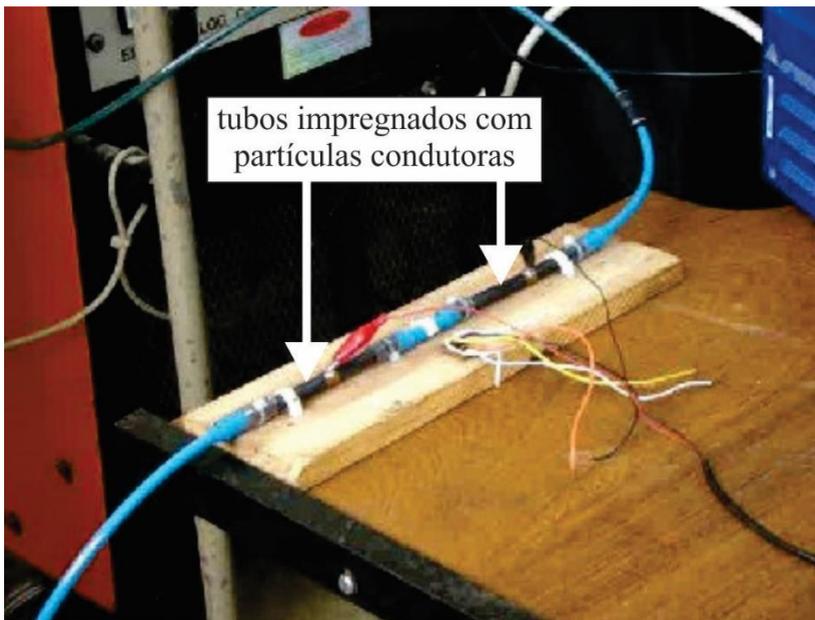


Figura 2.48 - Protótipo para medição de fluxo mássico de pó por eletrificação de partículas por tubos impregnados [12]

3 OBJETIVOS

O trabalho Análise, Caracterização e Desenvolvimento de Componentes e Sistemas de Alta Performance Dinâmica para Alimentação de Consumíveis em Processos de Soldagem apresenta os propósitos a seguir.

3.1 OBJETIVO GERAL

O principal propósito consiste em determinar influências de componentes fundamentais e de dispositivos experimentais propostos neste trabalho, sobre propriedades de manipulação em sistemas de alimentação de arame e pó. Busca-se, principalmente, formar base de dados técnicos para auxiliar a escolha de configurações dos sistemas, em função de condições de aplicação dos processos de soldagem. Aumentar o número de recursos disponíveis, em termos de aporte de materiais, é outro aspecto importante das contribuições deste trabalho. Com base no conhecimento gerado, novos sistemas de alimentação dinâmica de arame e pó serão desenvolvidos. Robustez e flexibilidade apropriadas para pesquisa em processos de soldagem são os principais requisitos.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Deve-se caracterizar os consumíveis em função de propriedades relevantes à sua manipulação. Parâmetros de deformação dos arames devem ser devidamente quantificados. Escoabilidade dos pós utilizados em testes, bem como faixa granulométrica e padrões morfológicos também devem ser determinados.
- Embora os módulos desentortadores possam remover curvaturas do arame, reduzindo o atrito destes com conduítes e bicos de contato, podem aumentar carga de tracionamento e complexidade dos sistemas. Portanto, este trabalho deve determinar quantitativamente o acréscimo de carregamento gerado por um ou quantos módulos forem necessários para remoção das deformações do arame.
- A carência sobre informações técnicas, relativas ao acréscimo de carga que os conduítes podem impor aos motores de tracionamento, insere no escopo deste trabalho uma investigação sobre os diversos tipos de conduítes disponíveis comercialmente. Da mesma forma, não se conhece a intensidade do efeito *Stick-Slip* em conduítes poliméricos. Assim, deve-se quantificar a influência do conduíte

sobre a carga de tracionamento, em função do seu material, dimensões e disposição espacial, além de determinar a intensidade do efeito *Stick-Slip* para cada caso.

- Perante as solicitações impostas pela função de tracionar arame, é necessário determinar qual mecanismo pode conferir maior eficiência aos sistemas em determinadas condições. As principais análises devem permitir comparações quantitativas entre a performance dinâmica de cada dispositivo, levando em consideração a incidência de escorregamento e dobramento do arame. O desenvolvimento de um protótipo de tracionador de esteiras será necessário para realizar um estudo mais abrangente.
- As restrições operacionais de sistemas experimentais e comerciais de alimentação dinâmica de arame vêm limitando avanços científicos em processos de soldagem. Neste aspecto, este trabalho se propõe a desenvolver dispositivos e estratégias de controle para, em conjunto com componentes já caracterizados, compor sistemas para alimentação dinâmica de arame mais robustos e flexíveis.
- A geração de energia eletrostática é consequente do transporte pneumático de pó. Perante este fato e à inexistência de um sensor que permita monitorar o comportamento do fluxo mássico de pó em processos de soldagem, este trabalho propõe descobrir se a energia eletrostática gerada pode ser proporcional à vazão mássica. Busca-se aqui contribuir tecnologicamente com o desenvolvimento de tal sensor, imprescindível para pesquisas científicas sobre estes processos.
- Processos de soldagem de alta capacidade para desenvolvimento de ligas metálicas, ainda se encontram desprovidos de alimentador robusto o bastante para manipular misturas experimentais. Para tanto, este trabalho propõe contribuir com o desenvolvimento de um novo mecanismo de dosagem, resistente a desgaste e capaz de operar com pós de difícil escoamento.
- A alimentação constante de pó, durante corrente pulsada para controle térmico de processos de soldagem gera períodos de baixa capacidade de fusão, acarretando em desperdício. Neste caso, a eficiência de fusão pode ser melhorada por alimentação dinâmica de pó. Este sistema pode ser obtido pela utilização do mecanismo de dosagem e do sensor de vazão mássica de pó aqui propostos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

De acordo com os objetivos específicos do presente trabalho, abordados no capítulo anterior, serão apresentados aqui materiais e métodos para alcançá-los. Para tanto, serão reportadas metodologias para caracterização de consumíveis, para avaliação dos sistemas existentes e, por fim, materiais e métodos para desenvolvimento de protótipos.

4.1 MATERIAIS E MÉTODOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS DE APORTE PARA SOLDAGEM

Será necessário caracterizar algumas propriedades dos materiais de adição (arame e pó) empregados afim de padronizar as condições em que os equipamentos serão testados.

As características dos arames mais influentes para os sistemas de alimentação são o material, o diâmetro do arame, o peso da bobina e os parâmetros de deformação *Cast* e *Helix*. O diâmetro do arame pode ser medido com um micrômetro. É também importante obter imagens micrográficas da superfície do arame, como na Figura 2.2, via MEV. Quanto aos parâmetros *Cast* e *Helix*, podem ser estimados empregando a norma SFA-5.18 [19], extraindo as medidas de acordo com a Figura 4.1 e a Figura 4.2, respectivamente. Deve-se cortar arame em quantidade suficiente para formar uma circunferência completa.

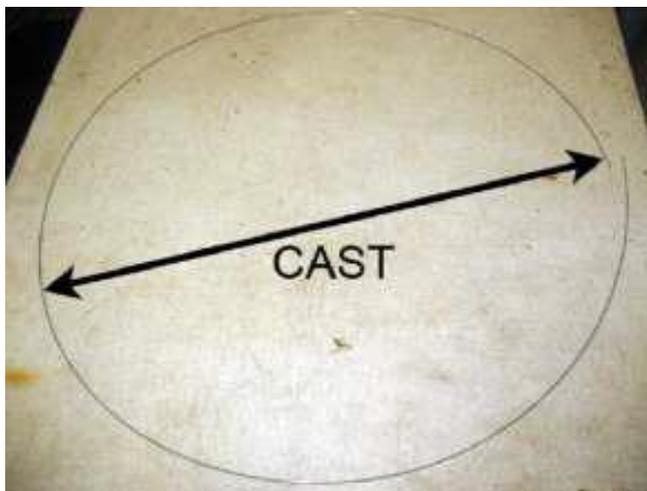


Figura 4.1 – Estimativa de parâmetro *Cast* de deformação de arame [19]

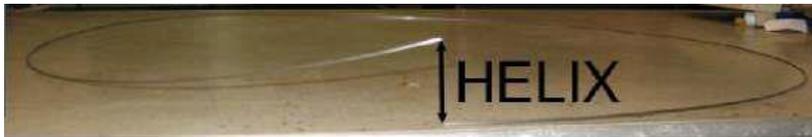


Figura 4.2 – Estimativa de parâmetro *Helix* de deformação de arame [19]

Já o peso da bobina pode ser determinado pesando-o diretamente com uma balança, fazendo-se as ponderações necessárias como material e forma do carretel.

Com relação aos consumíveis em pó, a característica mais influente sobre os sistemas de alimentação é a escoabilidade. Esta, por sua vez depende principalmente do material, da faixa granulométrica e da morfologia das partículas. A escoabilidade dos pós pode ser determinada empregando os métodos mostrados na Figura 4.3, propostos pela norma ASTM B213 [75]. O ângulo de empilhamento ϕ pode ser medido com transferidor, como mostrado na Figura 4.4. Tal ângulo representa a escoabilidade do material. Se o pó apresenta escoamento em funil, é apropriado o método da injeção ou da descarga, caso contrário, o método da inclinação pode ser utilizado para fornecer o ângulo ϕ .

Tanto a morfologia quanto a granulometria das partículas de pó podem ser caracterizadas via MEV. É possível, como mostra a Figura 4.5, observar nas imagens o formato predominante em um conjunto de partículas, além de medi-las e assim estimar sua faixa granulométrica.

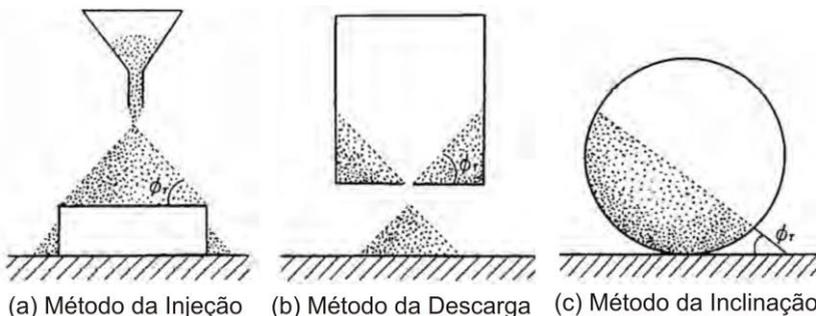


Figura 4.3 – Métodos para determinação da escoabilidade dos pós



Figura 4.4 – Medição do ângulo de empilhamento dos pós [13]

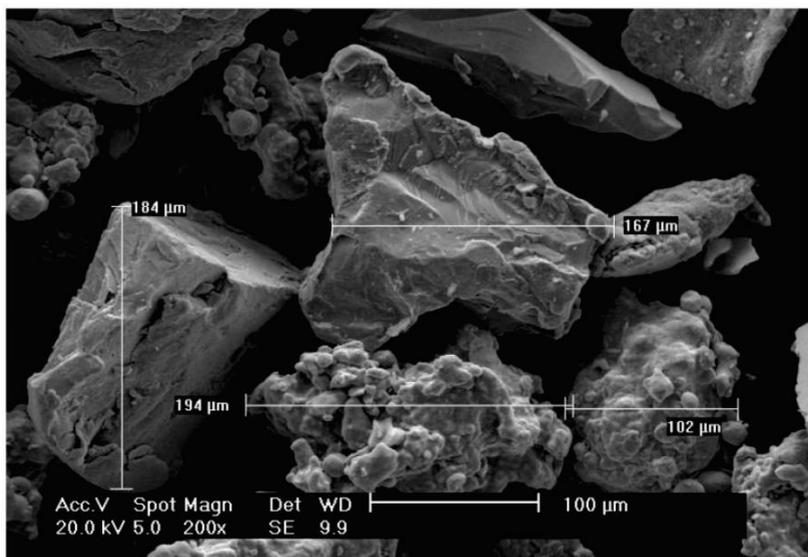


Figura 4.5 – Determinação de morfologia e faixa granulométrica de pós via imagem de MEV

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DE COMPONENTES E SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO

Esta etapa aborda meios para realização de análises rigorosas sobre o comportamento dos consumíveis na saída dos sistemas de alimentação, ou em outros pontos de interesse (durante soldagem ou

não). Monitoramento de tempo, deslocamento, massa, variáveis elétricas, vazões de gás e temperatura serão apresentados.

4.2.1 Câmera de Alta Velocidade

A principal ferramenta para realizar medições de deslocamentos rápidos em períodos de tempo extremamente curtos é a câmera de alta velocidade IDT Y4-S2, do fabricante MotionPro. Este recurso apresenta taxa de aquisição de até 5100 frames por segundo. É possível observar fenômenos dinâmicos que ocorrem rápido demais para serem percebidos pelo ser humano, em forma de filme em “câmera lenta” e com ampliação. Além disso, este equipamento pode adquirir dados de variáveis elétricas do processo simultaneamente à filmagem, gerando arquivos que permitem a sincronização desta com fenômenos do arco, poça de fusão e transferência metálica. A Figura 4.6 apresenta a bancada de filmagem montada durante atividades de pesquisa no processo PTA-P, enquanto a Figura 4.7 apresenta uma imagem extraída de um filme com sincronização de variáveis elétricas, no momento em que o cursor está na posição indicada. A filmagem pode ser empregada como método de medição de tempo e deslocamento do arame em pontos específicos, mesmo no interior dos equipamentos de alimentação como em [10,11]. A Figura 4.8 apresenta um método de medição de velocidade de arame, utilizando escala de deslocamento (papel milimetrado ao fundo) e tempo entre cada imagem que compõe o filme.

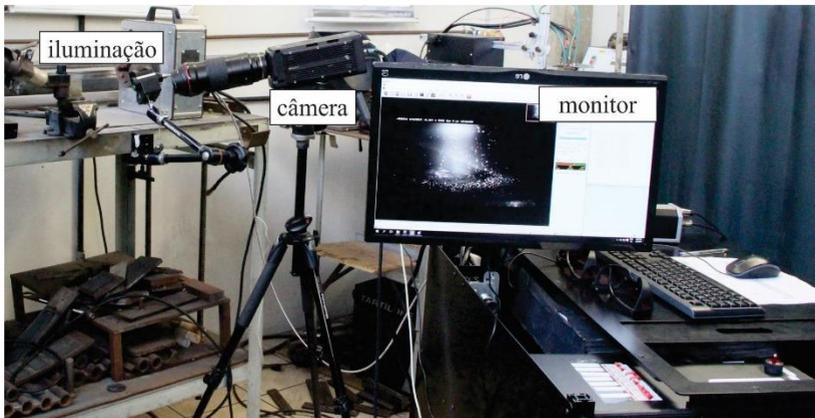


Figura 4.6 – Bancada de filmagem em alta velocidade

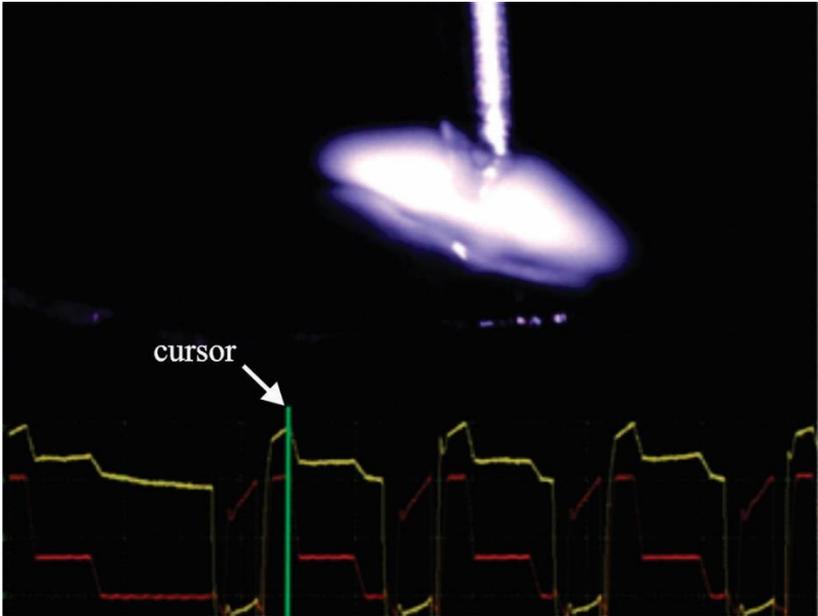


Figura 4.7 – Sincronização de filme com variáveis elétricas.



Figura 4.8 – Método de medição de velocidade de arame por filmagem em alta velocidade

4.2.2 Osciloscópio

Algumas atividades envolvidas no escopo deste trabalho, como análises de influência de condutores e desentortadores de arame sobre o tracionamento, exigirão monitoramento de parâmetros elétricos em atuadores. O monitoramento de corrente ou tensão nos motores pode ser realizado de maneira adequada com o osciloscópio TPS2024 do fabricante Tektronix. Este osciloscópio pode realizar monitoramento de correntes de até 70 A com resolução de 10 mA, em quatro canais. Frequências de até 200 MHz podem ser detectadas, com taxa de digitalização de 2 GS/s. Outra funcionalidade importante deste equipamento é a possibilidade de extração de dados aquisitados via USB e memória *Flash*. Os dados podem ser transferidos para computador e tratados via *softwares* como MS Excel®. A Figura 4.9 apresenta o equipamento, indicando as conexões USB e *Flash* além de mostrar um exemplo de tratamentos de dados em computador.

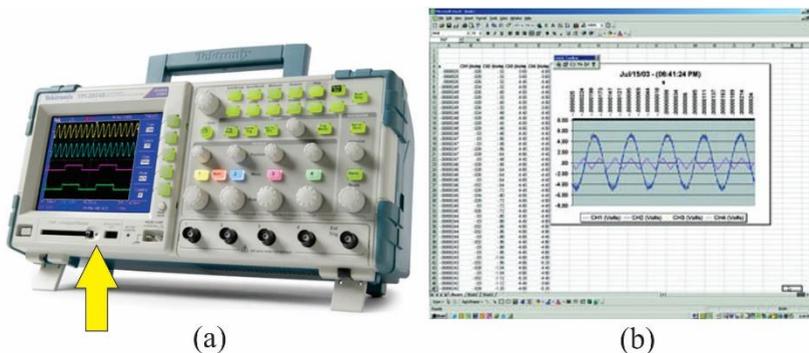


Figura 4.9 – Osciloscópio TPS2024: a) interface do equipamento com seta indicando localização de conexões USB e memória *Flash*; b) tratamento de dados via MS Excel

4.2.3 Sistema de aquisição de variáveis elétricas SAP

Grandezas elétricas envolvidas nos processos de soldagem também podem ser monitoradas independentemente da filmagem de alta velocidade, utilizando-se o sistema de aquisição SAP da empresa IMC. Além de corrente e tensão este sistema também efetua medição (com taxa de aquisição de 5 kHz) de velocidade de arame e vazão de gás. A Figura 4.10 apresenta a interface do SAP durante aquisição de dados.



Figura 4.10 – Interface do sistema de medição SAP

4.2.4 Outros Instrumentos

Contudo, às vezes mostra-se mais interessante observar e registrar, em forma de filme ou fotos, fenômenos que ocorrem em frequências melhor perceptíveis pelo ser humano (menores). Para esta finalidade são utilizadas as câmeras XIRIS na Figura 4.11 (a), e HEMA na Figura 4.11 (b). Estas permitem registros do monitoramento dos processos. Aspectos como estabilidade de arco, comportamento de transferência metálica e poça de fusão, além de posicionamentos e movimentos relativos entre peças e tocha, podem ser objetos de análise cautelosa em pesquisas.

A Figura 4.11 (c) apresenta uma válvula de controle de vazão mássica de gás modelo GFCS-010212 do fabricante Aalborg. Com faixa de operação entre 0,0 a 5,0 l/min, é essencial para o processo de avaliação dos sistemas de alimentação de pó em função do controle de vazão do gás de arraste.

Há também disponível uma balança modelo Mark S3201 e resolução 0,1 g do fabricante BEL, mostrada na Figura 4.11 (d). Tal instrumento pode ser empregado para levantar características

metrológicas dos sistemas de alimentação de pó a serem analisados, como repetibilidade, linearidade e reprodutibilidade.



Figura 4.11 – Câmeras para monitoramento de processos: a) XIRIS; b) HEMA
c) Válvula GFCS-010212; d) Balança Mark S3201

4.3 MATERIAIS E MÉTODOS PARA ANÁLISE, CARACTERIZAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE COMPONENTES E SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO

Nesta etapa serão abordados materiais e métodos para investigação e combate de problemas já previstos na fundamentação teórica deste trabalho, concernentes à sistemas de alimentação de arame e pó.

4.3.1 Análise, Caracterização e Desenvolvimento de Sistemas de Alimentação de Arame para Soldagem

Nesta sessão serão apresentados os métodos a serem empregados para análise de influência de conduítes e desentortadores de arame sobre

o acionamento de mecanismos de tracionamento. Também serão propostos métodos para análise de diferentes princípios de tracionadores de arame. Da mesma forma propõe-se também, nesta sessão, desenvolvimentos de novos componentes de sistemas de alimentação de arame.

4.3.1.1 Influência dos Desentortadores de Arame Sobre o Acionamento de Tracionadores

Devido ao esforço que os desentortadores aplicam sobre o arame para desentortá-los, é esperado que haja influência destes sobre a carga de tracionamento. Assim sendo, devem ser realizados testes. Será analisado o desentortador de arame da Figura 4.12, fabricado no LABSOLDA. O esforço aplicado sobre o arame é representado pela seta vermelha na Figura 4.12. O regulador de pressão movimenta um rolete desentortador contra os outros, induzindo deformações em sentido contrário ao esforço do arame, conforme ilustrado pela linha vermelha tracejada na figura.

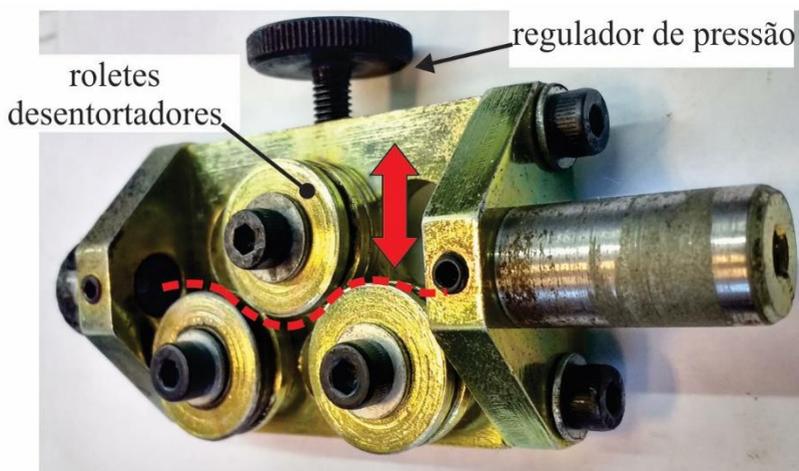


Figura 4.12 – Desentortador de arame fabricado no LABSOLDA

Os testes consistirão em aquisitar a corrente elétrica circulante no motor de tracionamento com o osciloscópio, frente as seguintes condições:

- Primeiramente serão realizados testes utilizando apenas um desentortador na posição vertical (remoção do *Cast*). Após, os testes serão repetidos com dois desentortadores, sendo um na posição vertical e outro na posição horizontal (remoção de *Cast* e *Helix*);
- Os testes serão realizados, a princípio, utilizando o tipo de tracionamento por roletes (convencional). Isto porque este é o mecanismo mais utilizado.
- Os desentortadores serão testados em operação com os arames de aço ER70S-6 e de alumínio ER4043. Assim será possível conhecer os efeitos sob operação com materiais maleáveis e mais resistentes.
- Para os dois materiais serão realizados testes com o rolo aproximadamente cheio e aproximadamente vazio. Isto permitirá determinar a diferença de carga oferecida pelos desentortadores em condições extremas.

4.3.1.2 Influência de Diferentes Tipos de Conduítes Sobre o Acionamento de Tractionadores

A falta de informações leva este trabalho a propor a realização de análises, buscando caracterizar cada tipo de conduíte em função da carga que estes podem acrescentar ao motor que realiza o tracionamento. O teste proposto, ilustrado pela Figura 4.13, conta com a fixação de um suporte a uma distância d do cabeçote. O conduíte será disposto de modo a formar um U na posição vertical, assumindo uma posição que induz certo grau de atrito e, ao mesmo tempo, representa uma condição prática mais comum.

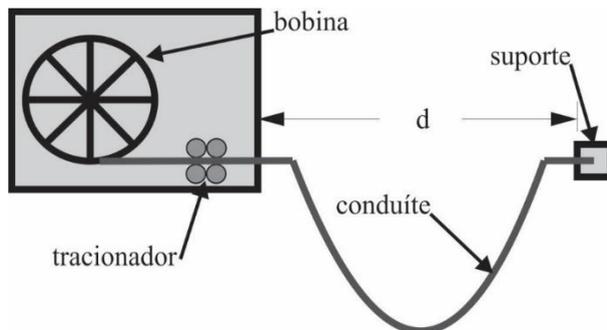


Figura 4.13 – Aparato para testes de influência de conduítes sobre o a carga de tracionamento

Os testes consistirão em adquirir a corrente elétrica circulante no motor de tracionamento com o osciloscópio, frente as seguintes condições:

- Os testes serão realizados, a princípio, utilizando o tipo de tracionamento por roletes (convencional). Isto porque este é o mecanismo mais utilizado.
- Os conduítes serão testados em operação com os arames de aço ER70S-6 e de alumínio ER4043. Assim será possível conhecer a influência dos conduítes em alimentação de materiais mais maleáveis e mais resistentes.
- Para todos os conduítes serão realizados testes com o rolo aproximadamente cheio e aproximadamente vazio. Isto permitirá determinar a diferença de carga oferecida por cada tipo de conduíte em função das deformações do arame.

As análises sobre o efeito *Stick-Slip* em utilização de conduítes poliméricos serão realizadas seguindo os mesmos métodos de [5]. Filmagens em alta velocidade durante soldagem com cada conduíte serão realizadas durante processos MIG/MAG nas versões Pulsado e CCC. Os testes serão realizados empregando dois tipos de bicos de contato (orifícios estrelado e circular). Deve-se ressaltar que os conduítes devem apresentar disposição padrão. Tal disposição deve apresentar dobra predominante de 90°. As velocidades de arame devem ser de 5,4 m/min para ambos processos.

4.3.1.3 Análise e Caracterização de Mecanismos de Tracionamento de Arame

Uma das principais contribuições deste trabalho consiste na determinação do tipo de tracionamento com melhor performance dinâmica. Para tanto serão realizadas análises para caracterização e posterior comparação de propriedades dinâmicas dos sistemas de alimentação estudados neste trabalho.

Desta forma, serão avaliados três mecanismos de tracionamento diferentes: o de roletes tradicional, o planetário e o de correias. Cada um deles será sujeito a reproduzir um perfil de velocidade semelhante ao empregado no processo Dabber TIG, o qual exige mais recursos em relação aos outros processos que utilizam alimentação dinâmica em

baixas frequências, como inversão de velocidade. A Figura 14 ilustra o perfil de velocidade exigido, associando um perfil real (vermelho) ao perfil ideal de performance dinâmica.

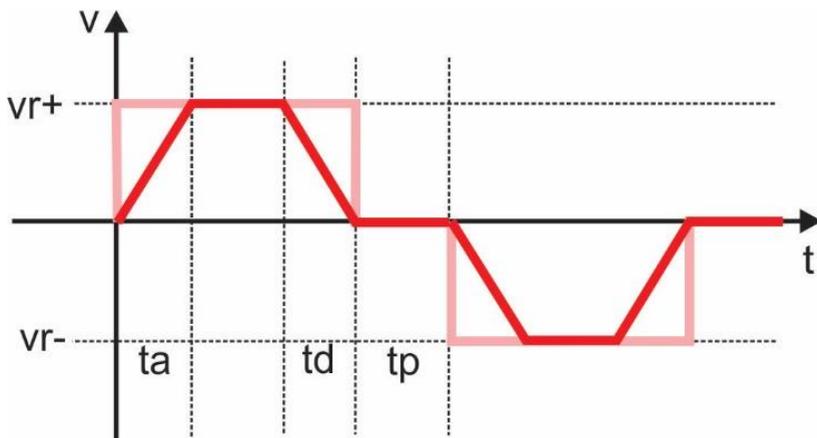


Figura 4.14 – Forma de onda de velocidade de arame em alimentação dinâmica

O sistema de melhor desempenho dinâmico será aquele capaz de apresentar, com maior frequência e amplitude, um perfil de velocidade mais aproximado possível da forma de onda de cor rosa, na Figura 4.14. Isto significa que o dispositivo será capaz de realizar alimentação dinâmica com rápida aceleração (t_a) e desaceleração (t_d), atingindo altas velocidades de regime em ambos sentidos (v_{r+} e v_{r-}). Contudo esta solicitação será exigida frente as seguintes condições:

- Operação com bobina de arame de aço ER70S-6 de 1,2 mm, em três níveis de massa diferentes: pesada, intermediária e leve. Tais níveis permitirão caracterizar o comportamento dos três sistemas em função do peso da bobina, simulando o consumo durante o processo. Será considerado limite de desempenho a partir da ocorrência de escorregamento nos roletes.
- Operação com bobina de arame de alumínio de 1,2 mm, em três níveis de massa diferentes: pesada, intermediária e leve. Tais níveis permitirão caracterizar o comportamento dos três sistemas em função do peso da bobina, simulando o consumo durante o processo. Será considerado limite de desempenho a partir da ocorrência de dobramento do arame.

A medição de deslocamentos e tempos (velocidade) será realizada por meio de filmagem em alta velocidade. Será tomada como referência uma marca no arame, logo à frente dos roletes. Tal procedimento permitirá melhor comparação entre o movimento de saída dos mecanismos já que, no tracionamento planetário, não seria possível tomar o movimento dos roletes (ou polias) como referência.

Para calcular a eficiência dos mecanismos é necessário tomar como referência valores teóricos, resultantes de equações capazes de descrever o comportamento da saída em função da entrada. Com relação ao tracionamento por roletes, pode-se determinar o comprimento de arame tracionado a cada volta do motor pela equação (1). De maneira semelhante, no mecanismo de esteira, o comprimento de arame tracionado é dado pela equação (2). Já no tracionador planetário, a equação de eficiência (3) calcula o passo da hélice descrita pelos roletes em função do deslocamento angular do motor. Nas equações, C_a é o comprimento do arame deslocado, d_r o diâmetro do rolete, d_p o diâmetro da polia, d_a o diâmetro do arame e R o fator de redução.

$$C_a = \frac{\pi \cdot d_r}{R} \quad (1)$$

$$C_a = \frac{\pi \cdot d_p}{R} \quad (2)$$

$$C_a = \frac{\pi \cdot d_a \cdot \text{tg}(45^\circ)}{R} = \frac{\pi \cdot d_a}{R} \quad (3)$$

4.3.1.4 Propostas de Novos Sistemas de Alimentação Dinâmica de Arame

Ultimamente, diversos trabalhos empreendidos no LABSOLDA vêm envolvendo alimentação dinâmica de arame, tanto em processos MIG/MAG como em TIG. Esta tendência é natural, já que um dos aspectos que mais tem contribuído para o aprimoramento dos processos de soldagem se trata justamente de detalhes na inserção do arame. Entretanto, na maioria dos casos, o dinamismo das pesquisas tem sido afetado, devido à inflexibilidade e deficiências operacionais dos sistemas de alimentação disponíveis. Tais fatores acarretam em atrasos nas atividades (multiplicação de objetivos e repetição de ensaios prejudicados) e, principalmente, limitação de resultados. É parte do

escopo deste trabalho propiciar a melhoria das condições de pesquisa, desenvolvendo novos sistemas de alimentação de arame. Por isto, os principais requisitos aqui adotados, são sugestões de trabalhos futuros de teses e dissertações, os quais estão elencados a seguir:

- Mecanismo de tracionamento na tocha: este recurso foi proposto por [6], com a intenção de reduzir interferências do conduíte sobre a estabilidade da transferência metálica em processo TIG Orbital. Os efeitos do conduíte sobre padrões de alimentação dinâmica também foram observados por [10]. Neste trabalho, o sistema de alimentação do processo TIP TIG mostrou-se incapaz de realizar o recuo do arame.
- Tracionadores mais eficientes: A importância de tempos menores de aceleração e desaceleração do arame em tracionamento por roletes foi observada por [3]. Para evitar instabilidades no processo MIG/MAG Pulsado com Pulsação Térmica, este autor foi obrigado a aprimorar o sistema de controle do sistema de alimentação. Em ocasião de seu trabalho os períodos de variação de velocidade de arame de 100 ms foram obtidos.
- Dispensa do *Buffer*: após desenvolvimento de sistema de alimentação dinâmica para atuação em transferência metálica em alta frequência (no processo MIG/MAG), [51] sugere investir também em sistemas que dispensem o dispositivo *Buffer*. Redução de recursos mecâtrônicos, além de simplicidade operacional são apontadas pelo autor como as principais vantagens.

De acordo com as sugestões de [6] e outros trabalhos [5, 6, 10] admite-se que, de fato, as influências do conduíte devem ser reduzidas ao máximo, quando se deseja obter um sistema de alta performance dinâmica. Levando em consideração estes resultados, fica evidente a necessidade de um sistema com tracionamento auxiliar. Todavia, acatando as sugestões de [51], este sistema, a princípio, deve dispensar a necessidade de *Buffer*.

De acordo as premissas supracitadas, considera-se a base da tecnologia do sistema de alimentação do processo TOP TIG, detentora de recursos promissores, em caso de não utilização de *Buffer*. Como abordado na sessão 2.2.2.1 do capítulo 2 deste trabalho, o motor do cabeçote desempenha função de escravo e permite controle de torque. Já

o motor da tocha, desempenha função de mestre e permite controle de velocidade.

O controle de torque baseia-se no controle da corrente elétrica que circula no motor do cabeçote. Assim, a limitação de torque em determinado nível faz com que este tracione arame a uma velocidade proporcional à carga que a bobina oferece. O motor da tocha, acionado por controle de velocidade (tensão do motor), tenderá a aplicar maior esforço de tração sobre o arame, pois a corrente está livre para se opor às cargas. Assim, ele desempenha seu papel de mestre enquanto o motor do cabeçote apenas auxilia o tracionamento. Como resultado, a atuação conjunta dos dois tracionadores manterá a porção de arame compreendida entre eles sob tração constante. Isto tende a reduzir a influência do efeito *Sitck-Slip* na alimentação dinâmica deste sistema. Levando em consideração o funcionamento do sistema TOP TIG, pode-se propor um sistema baseado nesta tecnologia para a alimentação dinâmica de arame. A proposta é esquematizada na Figura 4.15.

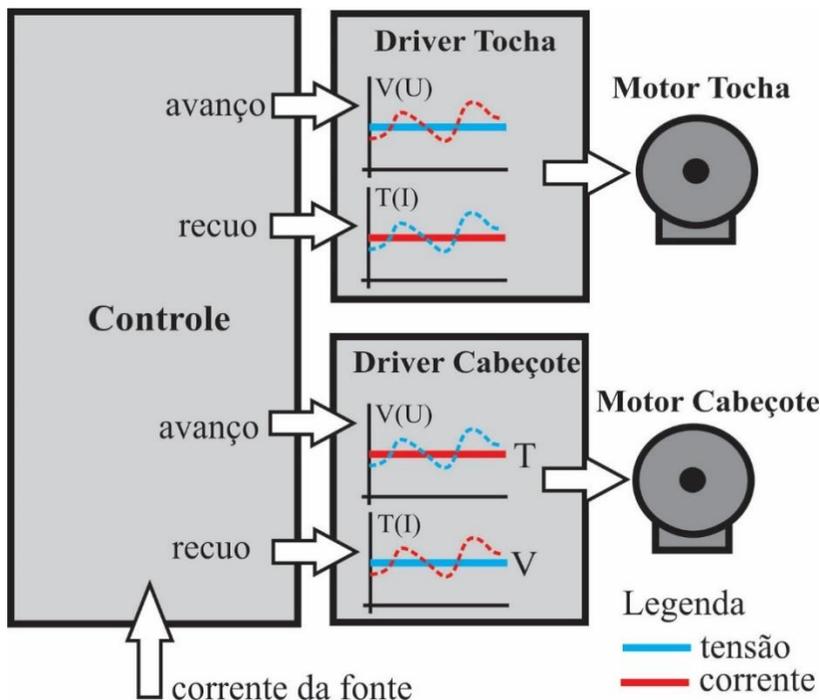


Figura 4.15 – Proposta de sistema de alimentação dinâmica em baixa frequência baseado em alternância de funções mestre e escravo entre os tracionadores da tocha e do cabeçote

A Figura 4.15 sugere um sistema de alternância de funções mestre e escravo entre os tracionadores da tocha e cabeçote, já que é necessário atuar no recuo do arame. Na fase de avanço, o sistema operaria de acordo com o sistema TOP TIG. Na fase de recuo, o sistema inverteria os modos de controle. A função de mestre (controle de velocidade) passaria para o motor do cabeçote, enquanto o escravo se tornaria o tracionador da tocha (controle de torque). Tal sistema poderia realizar o recuo com o arame também tensionado no interior do conduíte, dispensando o uso do *Buffer* e reduzindo o efeito *Stick-Slip*.

O sistema deve contar com o mecanismo de tracionamento que apresentou maior eficiência frente aos testes propostos na sessão anterior, como sugerido por [3]. O conduíte que integrará o sistema, pelo menos, em fase de testes deve ser o Powerliner. Com estes componentes será possível explorar a máxima capacidade da dinâmica de controle, associada aos componentes mecânicos mais indicados para cada função no sistema. Quanto ao acionamento, o primeiro protótipo empregará os drivers MADDT1205 (que permitem controle de torque e velocidade) e os motores (MSMD022P1T e MSMD012P1T). Estes componentes de acionamento (da Panasonic), apresentam alto desempenho dinâmico e estão disponíveis no LABSOLDA.

Os testes consistirão na medição de velocidade (tempo e deslocamento) por meio de filmagem de alta velocidade. O sistema será sujeito a realizar o perfil de velocidade apresentado na Figura 4.14. Este exige rampas de aceleração e desaceleração, além de velocidades de regime em ambos sentidos e tempos de parada em recuo e avanço de arame. O desempenho dinâmico máximo do sistema será caracterizado em função da sua capacidade em executar tal perfil de velocidade nos menores períodos possíveis. Nesta condição, deve apresentar patamares de regime de velocidade e tempos de parada em recuo e avanço.

O perfil de alimentação selecionado para estes testes corresponde à variante Dabber TIG, o qual representa o padrão mais complexo de alimentação em baixas frequências, uma vez que outros padrões não envolvem recuo de arame, como no MIG/MAG Pulsado com Pulsção Térmica e no TOP TIG. Todavia, não é possível saber, de antemão, se este sistema poderá operar em faixas de frequências compatíveis com processos TIP TIG e MIG/MAG curto-circuito (tipo CMT). Para estes casos serão propostos desenvolvimentos paralelos, descritos a seguir.

Em busca de flexibilidade em termos de regulagem de frequência e amplitude de oscilação de arame, para exploração científica sobre o processo TIP TIG, foi projetado um protótipo de sistema de alimentação dinâmica no LABSOLDA. O projeto, apresentado na Figura 4.16,

também é dotado de um sistema biela-manivela, colorido em azul, na figura. Este sistema permite regulagem de comprimento do raio da manivela, como mostrado na Figura 4.17, possibilitando variação de amplitude de oscilação do arame. Um conjunto de furos com distâncias diferentes em relação ao centro da manivela podem ser usados para fixação da biela, possibilitando valores de amplitude de movimento diferentes. A velocidade do motor também pode ser variada livremente. Por se tratar de um desenvolvimento do laboratório, o controle poderá ser manipulado de modo que o sistema permita estudos sobre frequências diferentes daquela oferecida pelo equipamento comercial. Com isto, o equipamento deve permitir pesquisa sobre novos padrões de movimentação na variante TIP TIG.

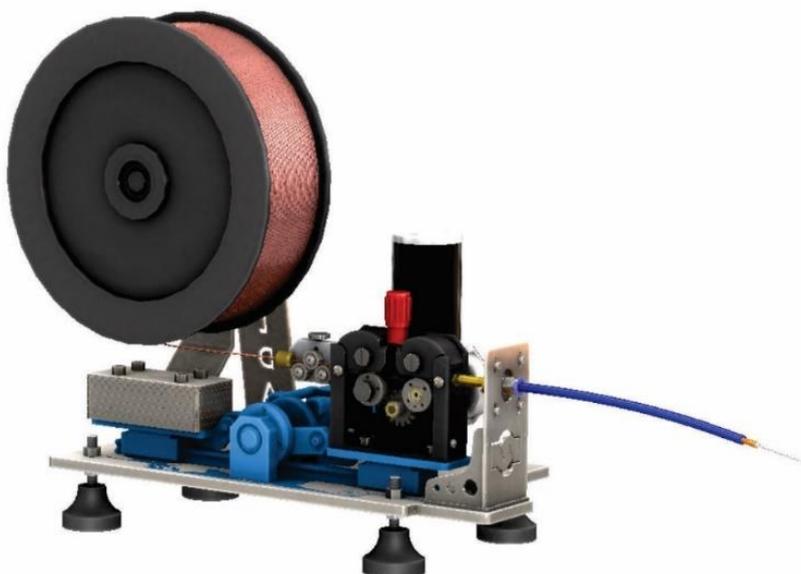


Figura 4.16 – Sistema de alimentação dinâmica de arame em alta frequência com amplitude variável para processos de soldagem com eletrodo não consumível

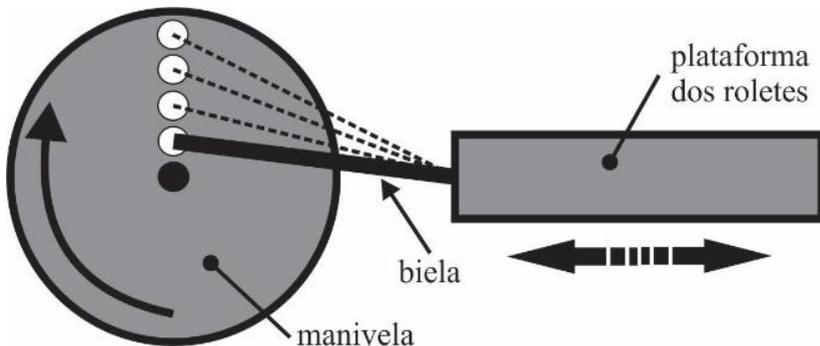


Figura 4.17 – Regulagem de amplitude do sistema de alimentação dinâmica de arame em alta frequência para processos com eletrodo não consumível

4.3.1.5 Osciladores de Arame de Pequeno Porte Dedicados a Alimentação Dinâmica em Altas Frequências

Outra solução vislumbrada se trata do emprego do mini oscilador de arame, ilustrado na Figura 4.18 (a), idealizado para sistemas de alimentação dinâmica de arame em alta frequência para processos de soldagem com eletrodo não consumível como o TIP TIG. Neste caso, pode ser empregado um cabeçote tracionador simples. Antes do direcionador de arame (próximo à tocha) acopla-se o mini oscilador compacto. Como explicado na figura a manivela, ao ser girada pelo motor, movimentará a guia rotativa em movimentos circulares. A guia rotativa, por sua vez, possui giro independente em torno do seu eixo, impedindo o dobramento do arame. Desta forma o mecanismo produzirá movimento de oscilação (senoidal) do arame na extremidade da alimentação, após a passagem deste pelo conduíte. Flexibilidade de regulagens para ampliação do campo de pesquisa também podem ser obtidas, já que a frequência pode ser variada pela velocidade do motor e, a amplitude, por sua vez, pode ser variada pela distância entre o centro da guia rotativa e o da manivela.

Outra alternativa de mecanismo oscilador pós conduíte, passível de ser empregada para sistemas de alimentação dinâmica de arame em alta frequência (tal como ocorre no processo TIPTIG) conta com um tipo de atuador chamado Voice Coil. Como mostra a Figura 4.18 (b), o eixo do Voice Coil recua e avança de acordo com a interação de campos magnéticos de um ímã e uma bobina energizada. Aplicando energia na bobina em períodos regulares, pode realizar movimentos de oscilação em frequências condizentes com as empregadas no processo TIP-TIG.

Contudo, o atuador em questão não atuaria diretamente sobre o arame, mas sim movimentando o conduíte. A Figura 4.18 (c) mostra que, fixando o conduíte ao eixo do Voice Coil, este pode ser capaz de provocar avanço e recuo do arame. O Voice Coil apresenta alta resposta dinâmica. De acordo com o fabricante BEI Kimco [76], há modelos que podem pesar em torno de 130 g, aplicar esforço de 15,6 N e atuar em frequências em torno de 85 Hz. Outros modelos podem aplicar forças maiores e operar em frequências superiores, entretanto mais pesados.

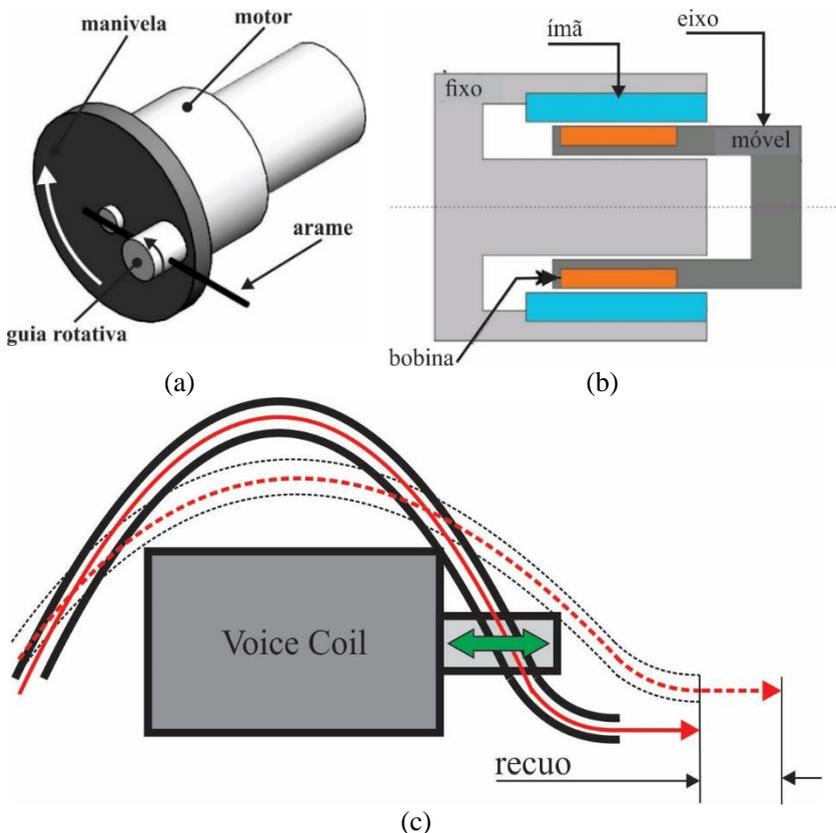


Figura 4.18 – Mecanismos de oscilação de arame pós conduíte: a) mini oscilador b) princípio de funcionamento de um Voice Coil [77]; c) esquema de funcionamento de um oscilador com atuador Voice Coil

4.3.2 Sistemas de Alimentação de Pó

Os desenvolvimentos acerca do sistema de alimentação de pó se concentrarão, principalmente em duas frentes. Fundamentalmente, na concepção de um novo mecanismo de dosagem. Estudo sobre o fenômeno de energia eletrostática ocorrente no transporte pneumático também está no escopo deste trabalho. Neste caso, deve-se investigar seu comportamento em relação à taxa mássica de pó, determinando sua capacidade em gerar sinal elétrico proporcional para medições.

4.3.2.1 Mecanismo de Dosagem de Pó

De acordo com o exposto no capítulo 2 deste trabalho, o ADP VR-F atendeu uma série de necessidades relacionadas à operação com pós de características diferentes dos padrões PTA-P (para elaboração de ligas via soldagem). Contudo, o mecanismo de dosagem não apresentou durabilidade e confiabilidade necessárias para consistir em uma solução robusta. Entre os alimentadores conhecidos, o ADP de Disco Vertical apresenta mecanismo de dosagem menos afetado por desgaste em atrito com o pó. Aliado a isto, também apresenta boas propriedades de alimentação em termos de continuidade, linearidade e repetitividade [15]. Contudo, este autor comentou sobre a ineficiência deste equipamento em operação com pós diferentes dos padrões de PTA-P, em função do diâmetro de descarga do seu silo, de 4 mm. O aumento deste até 25 mm (necessário ao escoamento de materiais alternativos) implicaria no aumento do diâmetro do disco vertical para mais de 0,6 m (para manter as proporções de projeto). Tal possibilidade foi rejeitada em função da perda de características de portabilidade requeridas pelo alimentador.

Contudo, no presente trabalho, detectou-se o princípio do disco vertical como sendo semelhante às esteiras de transportes de sólidos particulados [78]. Desta forma, a solução proposta aqui se trata de um mecanismo de dosagem por esteira transportadora, como o mostrado na Figura 4.19. Neste sistema, o silo apresentará canal de descarga retangular, com área compatível com um orifício circular de diâmetro 25 mm. A principal dimensão está indicada como D nesta figura, a qual se estende sobre a esteira (correia). A esteira pode conservar um perímetro semelhante ao disco, já que é plana, dispensando dimensões exageradas. Assim um motor, ao mover a esteira, desloca a pilha de pó que se forma continuamente sobre a superfície plana, até que as partículas caiam

sobre o funil da saída, onde estará conectada a linha de transporte pneumático.

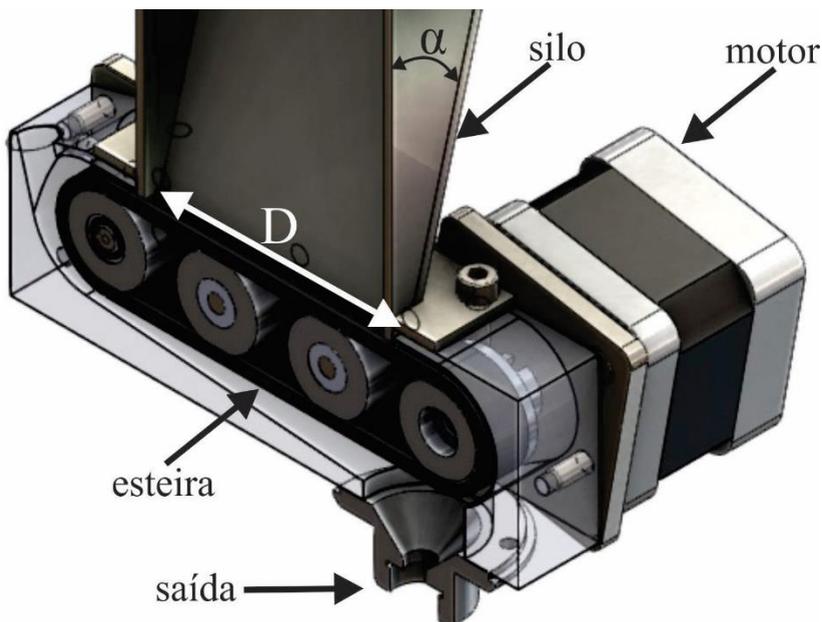


Figura 4.19 – Aspectos básico de projeto do ADP de esteira em ambiente CAD

O novo mecanismo de dosagem, que será desenvolvido de acordo com a Figura 4.19, será avaliado perante aos seguintes testes:

- O número maior possível de níveis de rotação deve ser tomado dentro da faixa de operação do protótipo. Em cada caso a vazão mássica resultante deve ser medida, de modo a originar curva de linearidade.
- O experimento anterior deve ser repetido uma série de vezes, de modo a permitir a determinação da repetibilidade do protótipo.
- Os experimentos anteriores devem ser realizados em manipulação de pós de diferentes morfologias e faixas granulométricas.
- Devem ser realizados testes de operação contínua durante períodos de tempo relativamente longos. Isto pode evidenciar as fragilidades mecânicas do dispositivo.

4.3.2.2 Sensor de Vazão Mássica de Pó

No LABSOLDA, já foram realizados estudos sobre o comportamento e os efeitos da energia eletrostática gerada em transporte pneumático, com vistas à sua utilização para medição da vazão mássica de pó [12]. Contudo, as características eletrostáticas demandaram um aparato de medição com um instrumento complexo e de dimensões desfavoráveis (um eletrômetro emprestado do departamento de Eng. Elétrica da UFSC) para medição de muito baixas correntes. O autor ressalta que desenvolvimentos são necessários para estabelecimento de novas condições de estudo. Menciona também que a obtenção de novo protótipo (sensor) de melhor qualidade depende de:

- Redução de tamanho;
- Melhoria na resposta em diferentes faixas de vazão;
- Melhoria de acoplamento mecânico e ligações elétricas entre os componentes do protótipo.

Baseado nos experimentos de [12], que empegou a estratégia de eletrificação de componentes por partículas carregadas, foi realizado o seguinte teste, cuja bancada é apresentada na Figura 4.20. Um pequeno pedaço de arame, chamado aqui de captador de pó, foi atravessado em um pedaço de mangueira de PVC cristal. Esperou-se, com isto, o carregamento da superfície interna da mangueira com elétrons provenientes das partículas de pó. Assim, o captador de pó, em contato com a superfície interna e também com as partículas do fluxo, deveria ser também polarizado negativamente, além de fornecer contato externo para conexão de um voltímetro. Caso este fenômeno ocorresse, apareceria uma diferença de potencial entre o captador e um ponto aterrado. Isto foi confirmado utilizando um voltímetro, durante simulação de alimentação em que o alimentador de disco horizontal transferia material a um recipiente sobre a bancada de soldagem. Como as indicações do voltímetro eram positivas, conclui-se que o captador de pó, de fato é carregado negativamente. A medição foi realizada, para dois experimentos repetidos nas mesmas condições, entre 0,7 a 9,7 rpm (rotação do disco horizontal), correspondendo a uma faixa de vazão de pó entre 0,15 a 1,74 kg/h (valores médios). Os dados coletados deram origem ao gráfico da Figura 4.21.

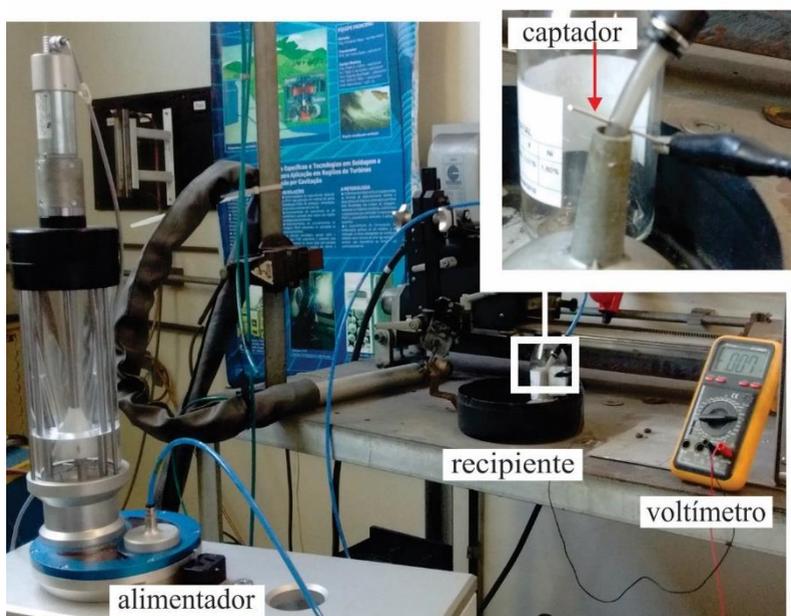


Figura 4.20 – Bancada de ensaios para avaliação de método de medição de fluxo mássico de pó

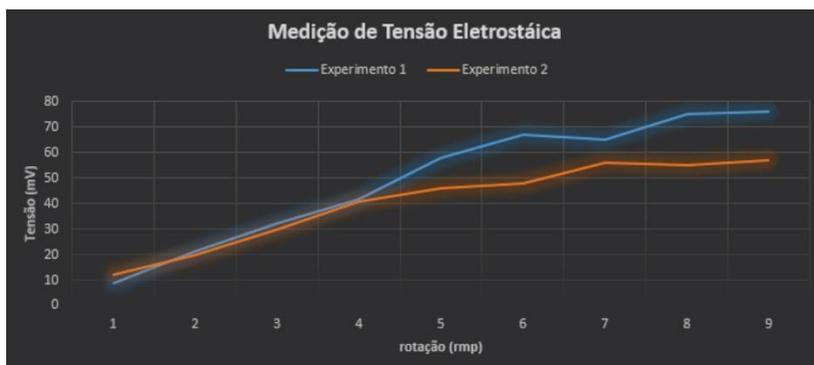


Figura 4.21 – Curvas de tensão em função da rotação do disco horizontal

Observando o gráfico da Figura 4.21 observa-se boas características de linearidade e repetitividade entre os dois experimentos até 4,4 rpm (0,81 kg/h). A partir desta rotação o segundo experimento produziu valores de tensão visivelmente menores até 9,7 rpm. Ainda

assim, os dois experimentos apresentaram resposta de tensão ascendente com o aumento da rotação do disco.

O resultado incentiva a continuidade da pesquisa, considerando a simplicidade do protótipo de captação de pó e das condições de medição do fenômeno. O trabalho seguirá com a adoção da seguinte metodologia:

- Substituição do multímetro pelo osciloscópio abordado neste trabalho. Assim deve-se descobrir maiores detalhes sobre a natureza deste sinal como nível de ruído elétrico, picos e quedas de tensão, além de outros aspectos do perfil.
- Análise sobre o comportamento estático do sinal. Deve-se levantar curvas de linearidade, semelhantes aquelas apresentadas na Figura 4.21. Contudo valores médios e desvios-padrão serão extraídos de maior número de dados. Deve-se também comparar o perfil do sinal elétrico entre cada nível de rotação da esteira.
- Influência de características morfológicas e granulométricas de diferentes pós. Os testes anteriores devem ser repetidos com diversos pós, constituídos por partículas de diferentes formas e tamanhos de grão.
- Análise sobre o comportamento dinâmico do sinal. Deve-se acionar o mecanismo de dosagem de modo que este pulse a vazão de pó em determinada frequência. O perfil medido pelo sensor será comparado ao perfil de acionamento. Deste modo pode-se estimar a capacidade dinâmica deste fenômeno em medição do fluxo mássico de pó.

4.3.2.3 Sistema de Alimentação Dinâmica de Pó

Uma vez obtido o sensor resultante do estudo sobre as características da energia eletrostática gerada em transporte pneumático de pós, pode-se utilizá-lo para, além de medição e controle, obtenção de um sistema de alimentação dinâmica, de acordo com as estratégias apresentadas na Figura 4.22.

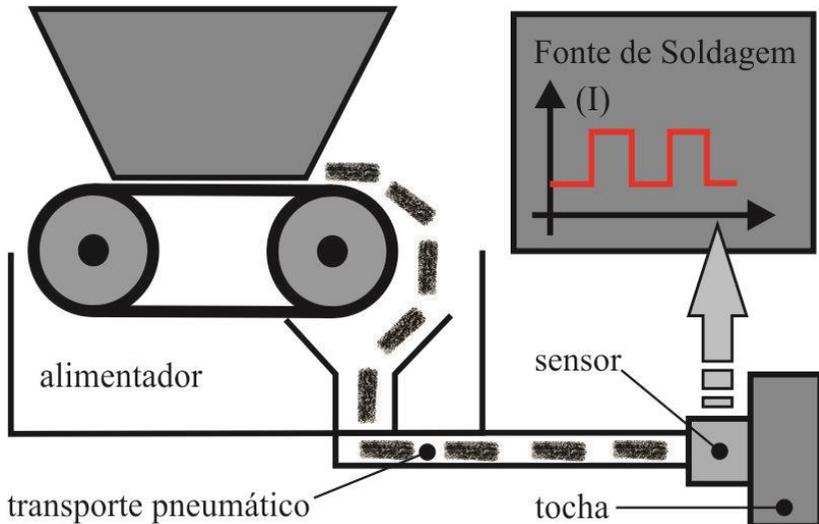


Figura 4.22 – Estratégia de controle para produção de alimentação dinâmica de pó em baixa frequência baseada em sensor de medição de vazão de pó

A estratégia principal consiste em pulsar a alimentação de pó em sincronismo com corrente de soldagem. A forma preferencial de conseguir esta condição de alimentação seria, pulsar a alimentação de acordo com a frequência regulada para a corrente de soldagem. O sensor identificaria os pulsos de alimentação e dispararia a fonte no momento adequado para ocorrência do sincronismo. Outra forma, menos convencional, mas possível de ser aplicada para pesquisa (valendo-se do sensor), seria alimentar o pó de forma pulsada. Cada sinal de pulso do sensor poderia ser usado para acionar o pulso de corrente de soldagem, após um *delay* conhecido. Tal *delay* poderia ser calculado medindo o tempo que o pó levaria para percorrer a distância compreendida entre o sensor e a saída da tocha de soldagem. A medição deste tempo pode ser feita por meio de filmagem de alta velocidade, onde a ocorrência do sinal de pulso do sensor pode ser identificada, sendo associada ao momento em que o pó é ejetado do bico da tocha PTA-P. Tal estratégia pode fornecer melhores condições de investigação sobre as vantagens do sincronismo entre corrente pulsada e alimentação de pó. Aspectos como aproveitamento do pó pelo processo [12], podem ser estudados de forma mais rigorosa.

5 CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

Na Tabela 5.1 são descritas as principais atividades que culminarão na redação e posterior defesa da tese de doutorado.

Normalmente, os desenvolvimentos envolvem a elaboração de projetos mecânicos e eletroeletrônicos, precisam de prazo para fabricação de peças e compras de componentes, necessitam de tempo para realização de testes e demandam tempo para documentação. Por isto, para cada atividade relacionada na segunda coluna da Tabela 5.1, o tempo de desenvolvimento pode apresentar até três cores consecutivas, as quais são explicadas na legenda desta tabela. Isto porque a documentação (azul) pode ser realizada de forma paralela às atividades. Houve a preocupação de dispor a sequência do trabalho de bancada (verde) de forma paralela ao desenvolvimento de projetos (amarelo) e à espera de produtos comerciais e peças de fabricação terceirizada (vermelho).

A interpretação da tabela pode ser explicada analisando, por exemplo, o mês de outubro de 2017. Na coluna correspondente a este mês pode-se constatar que estarão havendo testes de bancada com o Cabeçote de Amplitude Variável; há espera de peças do Oscilador de Manivela, do Oscilador Voice Coil e chegada do Cabeçote Planetário; O Tracionador de Esteiras estará em fase final de seu projeto; estará havendo documentação dos testes com o Cabeçote de Amplitude Variável.

Para conquista de todos os objetivos, o autor deste trabalho atuará como principal figura durante os testes de bancada, além de atuar como gerente de projetos eletroeletrônicos e mecânicos. Tal gerenciamento envolve a tomada das principais decisões de projeto de acordo com a pesquisa teórica, além de auxílio técnico às equipes de desenvolvimento. A disponibilidade destas equipes de projetos mecânicos e eletroeletrônicos no LABSOLDA tornam possíveis a realização das etapas de desenvolvimento e testes de forma paralela, uma vez que o gerenciamento não demanda tempo integral. Estas equipes também são fundamentais para fornecer dinâmica ao desenvolvimento deste trabalho, pois seu caráter multidisciplinar exige disponibilidade de *know how* técnico durante os desenvolvimentos.

Tabela 5.1 - Cronograma de Atividades

	2017												2018												2019											
	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J
1 Desentortadores de Arame																																				
2 Conduítes																																				
3 Cabeçote de Amplitude Variável																																				
4 Oscilador de Mamevela																																				
5 Oscilador Voice Coil																																				
6 Eficiência Tracionador Roletes																																				
7 Eficiência Tracionador Planetário																																				
8 Eficiência Tracionador Esteiras																																				
9 Sistema Alm. Din. de Arame																																				
10 Esteira Dosadora																																				
12 Estudo Sobre Medição de Pó																																				
13 Sistema Alm. Din. de Pó																																				
14 Artigos																																				
15 Elaboração da Tese de Doutorado																																				
16 Defesa da Tese de Doutorado																																				

Legenda:

Testes em Bancada
 Projetos Mecânica/Eletrônica
 Prazo para Compras
 Documentação

6 PREVISÃO ORÇAMENTÁRIA

Uma estimativa dos custos envolvidos para realização deste trabalho é apresentada na Tabela 6.1. Os atuais projetos em andamento no LABSOLDA, assim como o histórico de projetos desenvolvidos no referido instituto de mecatrônica, concedem recursos para aquisição de materiais e consumíveis. Contudo, deve-se ressaltar que muitos equipamentos de alto valor (marcados com *) já estão disponíveis no laboratório.

Tabela 6.1 – Previsão Orçamentária

Materiais/Equipamentos	Custo (R\$)
Câmera IDT Y4-S2*	320.000,00
SAP*	16.000,00
Osciloscópio TPS2024*	10.000,00
Balança BEL Mark S3201*	1.600,00
Válvula de controle de vazão de gás GFCS-010212*	3.000,00
Câmera XIRIS*	35.000,00
Câmera HEMA*	25.000,00
Desentortadores de arame*	4.000,00
Conduítes convencionais*	3.000,00
Conduíte Powerliner*	5.000,00
Cabeçote tracionador de arame convencional*	15.000,00
Cabeçote Planetário	25.000,00
Desenvolvimento de Tracionador de Correias	10.000,00
Cabeçote de Amplitude Variável*	15.000,00
Oscilador de Manivela	2.000,00
Oscilador Voice Coil	6.000,00
Desenvolvimento de sistema de alimentação dinâmica de arame	60.000,00
Mecanismo de Dosagem de Esteira	10.000,00
Sensor de Pó	15.000,00
Desenvolvimento de sistema de alimentação dinâmica de pó	50.000,00
Materiais para confecção de corpos de prova	5.000,00
Consumíveis de soldagem (aramé, gases...)	3.000,00
Serviço de usinagem	15.000,00
Suporte técnico	5.000,00
Total	658.600,00

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista toda a problemática abordada neste exame de qualificação para tese de doutoramento, verifica-se urgente necessidade em analisar, caracterizar e desenvolver componentes e sistemas de alimentação de material para processos de soldagem.

A adoção de procedimentos capazes de quantificar propriedades de arames e pós influentes sobre os sistemas de manipulação, podem fornecer informações sólidas para escolha de componentes dos sistemas de alimentação. Além disto, podem definir o relacionamento de escoabilidade de pós e deformações de arames com problemas em processos de soldagem. Quanto aos sistemas de alimentação de arame, a caracterização individual de componentes como tracionadores, conduítes e desentortadores pode fornecer informações relevantes para a sua utilização. A seleção de cada tipo de componente pode ser baseada em dados técnicos quantitativos, ao invés dos métodos intuitivos e argumentos comerciais. Este tipo de informação não permite que o operador desenvolva um senso técnico adequado para avaliação do uso dos componentes nos processos de soldagem. Em função da importância da qualidade de alimentação de arame exigida pelo processo pode-se, por exemplo, comparar o benefício do componente com seu custo, adquirindo maior poder de decisão. Este tipo de informação também é imprescindível para munir os sistemas de alimentação dinâmica de arame, com os componentes que melhor favorecem suas qualidades.

Com relação aos desenvolvimentos em sistemas de alimentação de pó, estes também são indispensáveis para que se possa desfrutar das vantagens que processos como PTA-P e LASER *Cladding* podem fornecer em soldagem de revestimento. No cladeamento por soldagem LASER, a regularidade na alimentação é de total necessidade, já que o feixe LASER consiste em uma fonte de energia de alta estabilidade. Embora o arco plasma do PTA-P também possa apresentar alta estabilidade (exigindo regularidade de aporte de material), sistemas de alimentação mais robustos e flexíveis podem torna-lo mais eficiente em termos de aproveitamento de pó e desenvolvimento de ligas experimentais. O desenvolvimento do mecanismo de dosagem de esteira transportadora e do sensor propostos, podem consistir nos recursos necessários para a obtenção de um sistema de alimentação dinâmica de pó, apto a satisfazer aos requisitos dos processos supracitados.

Levando em consideração os fatos supracitados, o presente trabalho veio salientar sobre a importância em produzir conhecimento mais avançado, acerca de componentes e sistemas mecatrônicos para

aporte de material em processos de soldagem. Foi exemplificada a dependência da indústria nacional de Petróleo e Gás por processos tecnologicamente mais avançados e, por sua vez, a dependência destes em termos de equipamentos mais robustos e flexíveis. Estes mesmos equipamentos podem dinamizar as pesquisas de processos, reduzindo repetição de ensaios em função de falhas de alimentação, além de reduzir a ocorrência de objetivos imprevistos. Por fim, abrangência de pesquisas científicas em processos de soldagem pode ser ainda mais ampliada. Em outro aspecto, a dependência de tecnologia externa é drasticamente prejudicial para o desenvolvimento da soldagem e da indústria no Brasil, uma vez que, além dos equipamentos estrangeiros, é preciso importar a assistência técnica e até mesmo mão de obra. Sem o desenvolvimento e posse de tecnologia, a indústria fica condenada às antigas soluções, os antigos processos e os mesmo problemas que se impõem em forma de uma barreira contra o desenvolvimento.

8 REFERÊNCIAS

- [1] SILVA, R. H. G. **Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto-Circuito Controlado Aplicada ao Passe de Raiz**. 2005. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- [2] CUNHA, Tiago Vieira da. **Desenvolvimento e avaliação de tecnologia para soldagem TIG com pulsação ultrassônica**. 2013. 266 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2013.
- [3] GOHR JR, R. **Desenvolvimento de Novos Métodos de Controle da Soldagem MIG/MAG**. 2002. 150 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- [4] Dual Belt Wire Tractor. Disponível em: <http://www.novoprecision.com/products/linear-feed-drives/>. Acesso em 08 de dez. de 2016.
- [5] SILVA, R. H. G. et al. **Uma Contribuição para o Estudo de Problemas na Alimentabilidade do Processo GMAW Parte 2 – Stick-Slip**. Relatório Interno LABSOLDA, 14 p. Florianópolis, 17/04/2017.
- [6] PAES, Luiz Eduardo dos Santos. **Soldagem TIG Orbital – Técnica de Alimentação Dinâmica do Arame Visando Aumento na Produtividade**. 2016. 206 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
- [7] MARQUES, C. **Prospecções da Natureza Física da Soldagem MIG Automática de Ligas de Alumínio**. 2013. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- [8] SAVI, B. M. **Desenvolvimento Tecnológico para Soldagem MIG de Ligas de Alumínio 5083 H116**. 2014. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.
- [9] RIFFEL, K. C. **Advances in the GTAW Process – Contribution of Dynamic Feeding in the Robustness of Mechanized Welding out of**

Position. Relatório Interno LABSOLDA, 10 p. Florianópolis, 13/06/2017.

[10] SILVA, R. G. N. **Caracterização do Processo de Soldagem TIG com Alimentação de Arame Dinâmica em Alta Frequência.** Trabalho de Conclusão de Curso - CTC/EMC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil : UFSC, 2016.

[11] RODRIGUES. A. G. **Controle e Atuação do Sistema de Movimentação Dinâmica de Arame em Processos de Soldagem a Arco.** Trabalho de Conclusão de Curso - CTC/DAS, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil : UFSC, 2017.

[12] SILVA, R. H. G. **Inovações em Equipamentos e em Parametrização no Processo de Revestimento por Plasma-Pó (PTA-P).** 2010. 265 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

[13] RIBEIRO, H. O. **Desenvolvimento de Ligas Para Revestimentos por PTA Resistentes à Cavitação.** 2007. 167 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

[14] ALVES, Jônathas Alexandre; SILVA, Régis Henrique Gonçalves e; DUTRA, Jair Carlos. **Development of a Powder-feed Device and Procedures for the Application of an Experimental Alloy in Overhead PTA-P Welding.** Revista Soldagem e Inspeção, v. 20, p. 412-422, 2015.

[15] ALVES, J. A. **Desenvolvimento de um Sistema de Alimentação de Consumíveis em Pó para Soldagem Pta-P com Capacidade para Manipulação e Transporte em Oposição à Gravidade.** 2011. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

[16] Avanços da soldagem Pré-Sal. Disponível em: <http://www.abemi.org.br/cenpespetrobras>. Acesso em 26 de out. de 2016.

[17] O Pré-Sal Já é Uma Realidade. Disponível em: <http://www.infosolda.com.br>. Acesso em 26 de out. de 2016.

[18] SILVA, F. L. S e. **Desenvolvimento de Estratégias para Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco.** Trabalho de Conclusão de Curso - CTC/EMC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil : UFSC, 2017.

[19] MOURA, Márcio Luiz de. **Análise dos Efeitos dos Semiângulos de Feira de Trefilação Utilizados na Fabricação de Arames Sólidos na Estabilidade do Processo de Soldagem GMAW.** 2014. 103 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, 2014.

[20] CETLIN, Paulo. **Trefilação de Arames de Aço**. 2007. Apostila Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Minas Gerais.

[21] MOTTA, M. F. **Aplicação do Processo MIG/MAG Pulsado com Duplo Arame e Potenciais Isolados em Soldagens de Revestimento**. 2002. 153 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

[22] Processos de Soldagem: Arames Tubulares. Disponível em: <http://www.esab.com.br>. Acesso em 12 de dez. de 2016.

[23] Parâmetros de Deformação Cast e Helix em Arames para Soldagem. Disponível em: <http://weldingproductivity.com>. Acesso em 14 de dez. 2016.

[24] SARTORI, Francisco. **Tecnologias e Técnicas Modernas do Processo MIG/MAG para o Passe de Raiz em Soldagem Orbital de Tubos**. 2016. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

[25] Egerland, Stephan. **A Contribution to Arc Length Discussion**. Revista Soldagem e Inspeção, v. 20, p. 367-380, 2015.

[26] PIGOZZO, I.O. **Soldagem TIG orbital: otimização de equipamentos e prospecções tecnológicas para procedimentos de passe de raiz**. 2014. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Depto. Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

[27] SPILLE-KOHOFF, A. **Arc Welding: From Process Simulation to Structural Mechanics. Part 1: Process Simulation with ANSYS CFX**. In: 4 th European Automotive Simulation Conference (EASC), 2009. Munich. Anais. p. 1-12.

[28] ASM HandBook. **Powder Metal Technology and Applications**. 9th ed. ASM International, 1998. Vol 7. p. 2762.

[29] MARCONI, M. **I Riporti duri con polveri saldate con il processo P.T.A. (Plasma ad Arco Trasferito)**. Livro Online (www.plasmateam.com), 320 p. 2002.

[30] XIBAO, W.; HUA, L. **Metal Powder Thermal Behavior during the Plasma Transferred-arc Surfacing Process**. Surface and Coatings Technology, v. 106, n. 1-2, p. 156-161. ago. 1998.

- [31] PRESCOTT, J. K.; BARNUM, R. A. **On Powder Flowability**. Pharmaceutical Technology, p. 60-84. out. 2000.
- [32] SCHULZE, D. **Powders and Bulk Solids – Characterization, Storage and Flow**. Berlin Heidelberg, New York: Springer, 2008. p. 461.
- [33] OTC Wire Feeder CM 7401 Manual. Disponível em: <http://www.daihen-usa.com>. Acesso em 16 de jan. de 2017.
- [34] Alimentador de Arame TBI Planetary. Disponível em: <http://www.maqsoldas.com.br>. Acesso em 17 de jan. de 2017.
- [35] Alimentador Planetário PF 16. Disponível em: <http://www.tbi-industries.com>. Acesso em 17 de jan. de 2017.
- [36] Conduítes para Soldagem. Disponível em: <http://www.tbi-industries.com>. Acesso em 20 de jan. de 2017.
- [37] BENGISU, M. T; AKAY, A; **Stick-Slip Oscillations: Dynamics of Friction and Surface Roughness**. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 105, No. 1, January 1999.
- [38] RABINOWICZ, E.; **Stick and Slip**. Scientific American, Inc. pp. 109-118. 1956.
- [39] ASHIDH, K.; SANTHA KUMARI, A.; SUMESH, A.; RAJASEKARAN, N. **Influence of stick-slip effect on gas metal arc welding**. Applied Mechanics and Materials. Vol. 813-814, pp. 438-445. 2015.
- [40] LEINE, R. I.; VAN CAMPEN, D. H.; DE KRAKER, A.; VAN DEN STEEN, L. **Stick-slip Vibrations Induced by Alternate Friction Models**. Nonlinear Dynamics. Vol. 16, pp. 41-54. 1998.
- [41] Tochas de Soldagem Para Robôs. Disponível em: <http://www.tbi-industries.com>. Acesso em 07 de fev. de 2017.
- [42] Funcionamento de Motor Pneumático: Disponível em: <http://www.atlascopco.com>. Acesso em 13 de fev. de 2017.
- [43] Tracionador Auxiliar Pneumático: Disponível em: <https://www.wire-wizard.com>. Acesso em 14 de fev. de 2017.
- [44] BOHORQUEZ, C. E. N. **O Calor em Soldagem e seus Efeitos**. 2015. Apostila de Metalurgia da Soldagem. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina.
- [45] CHOWDARY, B. V.; MAHARAJ, R. R.; LEWIS, W. G. Development of Welding Parameters to Perform Root Pass Welding Using a Mechanized GTAW Process: A Case Study. The West Indian Journal of Engineering. v. 32, p. 20-27, 2010.
- [46] JETLINE ENGINEERING. Operation Manual for CWF-23-E-9900 Dabber Type Wire Feeder. Irvine, CA. 2013.

- [47] Ângulo do Eletrodo no Processo TOP TIG. Disponível em: <http://www.oerlikon.sk>. Acesso em 09 de mar. de 2017.
- [48] OPDERBECKE, T.; GUIHEUX, S. **TOPTIG: Robotic TIG Welding with Integrated Wire Feeder**. Welding International, v. 23, p. 523-529, 2009.
- [49] Instalações para Aplicações Robóticas e Automáticas. Disponível em: <http://www.saf-fro.ro>. Acesso em 16 de mar. de 2017.
- [50] Detalhes Técnicos do TOP TIG. Disponível em: <https://www.airliquide.com>. Acesso em 16 de mar. de 2017.
- [51] MARQUES, C. **Análise de Técnicas e Efeitos Físicos da Alimentação Dinâmica do Arame no Processo de Soldagem MIG/MAG com Vistas ao Desenvolvimento de um Sistema Flexível Nacional**. 2017. 209 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [52] WILSON, M. **TIP TIG: New Technology for Welding**. International Robot: An International Journal, v. 34, p. 462-466, 2007.
- [53] TIP TIG - The Evolution of TIG – Technical Manual [S.l.].
- [54] PINTO, H. et al. A Comparative Study of Microstructure and Residual Stresses of CMT, MIG and Laser Hybrid Welds. Materials Science Forum, p. 627-632, 2006.
- [55] FENG, J.; ZHANG, H.; HE, P. **The CMT short-circuiting metal transfer process and its use in thin aluminium sheets welding**. Materials and Design, 30, 2009. 1850-1852.
- [56] FOKENS, R. **Cold Metal Transfer - CMT - A Revolution in Mechanized Root Pass Pipeline Welding**. 4th Pipeline Technology Conference. Hannover, Germany. 2009.
- [57] KIM, C. **Back Bead Characteristics during Butt Welding of a Thick Plate for Various Backing Conditions**. Materials Science Forum, 654-656, junho 2010. 350-353.
- [58] PICKIN, C. G.; WILLIAMS, S. W.; LUNT, M. **Characterisation of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding**. Journal of Materials Processing Technology, Vol.211, março 2011. 496-502.
- [59] EGERLAND, S. A. **Status and Perspectives in Overlaying under Particular Consideration of Sophisticated Welding Processes**. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 27, n. n°2, 2009. 50-54.
- [60] BRUCKNER, J. **Cold Metal Transfer Has a Future Joining Steel to Aluminum**. Welding Journal, Vol.84, n. 6, Junho 2005. 38-40.
- [61] ZHANG, H. T.; FENG, J. C.; HE, P. **Interfacial phenomena of cold metal transfer (CMT) welding of zinc coated steel and wrought**

- aluminium.** Materials Science and Technology, novembro 2008. 1346-1349.
- [62] ZHANG, H. T. et al. **The arc characteristics and metal transfer behaviour of cold metal transfer and its use in joining aluminium to zinc-coated steel.** Materials Science and Engineering, 499, janeiro 2009. 111-113.
- [63] FRONIUS INTERNATIONAL GMBH. **Manual de instrução de operação - Controle Remoto RCU5000i.** (S.l.), p. 241. 2010.
- [64] Sistemas Laser Cladding. Disponível em: <https://www.oerlikon.com>. Acesso em 05 de abr. de 2017.
- [65] Serviços em Laser Cladding. Disponível em: <http://www.alspi.com>. Acesso em 11 de abr. de 2017.
- [66] Laser Cladding e Manufatura Aditiva. Disponível em: <http://www.iws.fraunhofer.de>. Acesso em 12 de abr. de 2017.
- [67] LI, Huishan. et al. **A numerical simulation of movement powder flow and development of the carrier-gas powder feeder for laser repairing.** SPIE Digital Library, v. 5629, p. 557-564, 2005.
- [68] YANG, Xi-Chen. et al. **A new co-axial powder feeder without carrying gas for laser direct materials deposition.** SPIE Digital Library, v. 4915, p. 153-161, 2002.
- [69] RAGU, D.; WEBBER, R. **PTA Proves its Worth in High Volume Hardfacing Job.** Welding Journal, v. 75, n. 2, p. 34-40. Miami, fev. 1996.
- [70] **Arcraft Plasma Website.** Disponível em: WWW.arcraftplasma.com. Acesso em 25 de mar. de 2009.
- [71] **PM-10 Powder Feeder.** Disponível em WWW.plasma-master.com.ua. Acesso em fev. 2009.
- [72] **PM-10 Powder Feeder Operating Manual.** Plasma Master. 6 p.
- [73] **PF LC 2/1 GVT Powder Feeder.** Disponível em: <http://www.gtv-mbh.com>. Acesso em fev. 2017.
- [74] SILVEIRA, C. A.; PEREIRA, M.; SILVA, R. H. G; ALVES, J. A. **Caracterização Operacional de um Sistema de Alimentação de Pó Tipo Disco Horizontal.** IX COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Junho 2017, Joinville, SC, Brasil.
- [75] **Standard Test Method for Flow Rate of Metal Powders ASTM B 213 97.** ASTM
- [76] Voice Coil Linear Actuators Datasheet. Disponível em: <http://www.beikimco.com>. Acesso em 16 de mai. de 2017.
- [77] Funcionamento de um Voice Coil. Disponível em: <http://ariwatch.com>. Acesso em 16 de mai. de 2017.

[78] McGlinchey, D. **Bulk Solids Handling – Equipment Selection and Operation**. Glasgow Caledonian University: Blackwell Publishing, 2008. p. 303.