

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA  
CATARINA**

**DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA  
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

**JÔNATHAS ALEXANDRE ALVES**

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO ALIMENTADOR DE PÓ (ADP) PARA  
SOLDAGEM PTA-P COM CAPACIDADE DE MANIPULAÇÃO DE MATERIAIS  
NÃO CONVENCIONAIS**

**FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2018**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA  
CATARINA  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA  
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

**JÔNATHAS ALEXANDRE ALVES**

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO ALIMENTADOR DE PÓ (ADP) PARA  
SOLDAGEM PTA-P COM CAPACIDADE DE MANIPULAÇÃO DE MATERIAIS  
NÃO CONVENCIONAIS**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Mecatrônica do Departamento de Metal Mecânica do Instituto Federal de Santa Catarina como requisito para obtenção do Título de Engenheiro Mecatrônico.

Orientador: Prof. Dr. Erwin Werner Teichmann  
Co-orientador: Prof. Dr. Régis Henrique Gonçalves e Silva

**FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2018**

Alves, Jônathas Alexandre

Desenvolvimento de um Dispositivo Alimentador de Pó (ADP) para Soldagem PTA-P com Capacidade de Manipulação de Materiais Não Convencionais / Jônathas Alexandre Alves; orientação de Erwin Werner Teichmann. - Florianópolis, SC, 2019.

78 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecatrônica) - Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. Inclui Referências.

1. Consumíveis em pó. 2. Misturas experimentais. 3. Difícil escoamento. 4. Soldagem de revestimento. I. Teichmann, Erwin Werner. II. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica. III. Bacharelado em Engenharia Mecatrônica.

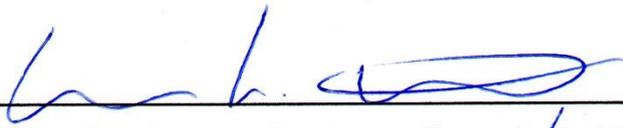
**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO ALIMENTADOR DE PÓ  
(ADP) PARA SOLDAGEM PTA-P COM CAPACIDADE DE  
MANIPULAÇÃO DE MATERIAIS NÃO CONVENCIONAIS**

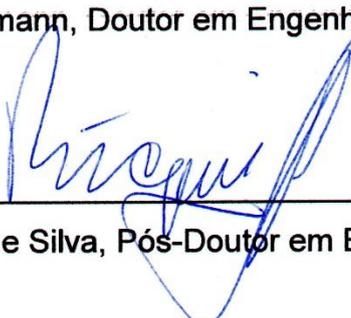
**JÔNATHAS ALEXANDRE ALVES**

Esse trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

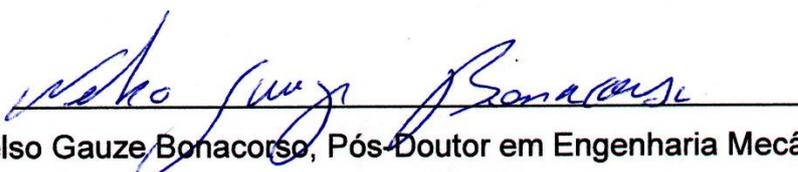
Florianópolis, 13 de dezembro, 2018.

Banca Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Erwin Werner Teichmann, Doutor em Engenharia Mecânica

  
\_\_\_\_\_  
Régis Henrique Gonçalves e Silva, Pós-Doutor em Engenharia Mecânica

  
\_\_\_\_\_  
Mateus Barancelli Schwedersky, Doutor em Engenharia Mecânica

  
\_\_\_\_\_  
Nelso Gauze Bonacorso, Pós-Doutor em Engenharia Mecânica

## **AGRADECIMENTOS**

À minha esposa, Patrícia, por todo amor, apoio, compreensão, paciência e consultorias ao longo desta grande caminhada.

A meus pais José e Maria de Lourdes pela vida, educação, apoio e exemplo, fatores primordiais para concluir este curso e seguir a vida em frente. Também aos meus irmãos Kátia, Kelly, Karen e José Antônio pelo companheirismo, inspiração e apoio longo do curso e da vida. Pelos mesmos motivos, agradeço aos meus cunhados Vanderlei, Henrique, Caio, Manuella, Mariah e Murilo, e também meus sogros Natanael e Suzana.

Ao meu orientador prof. Erwin, por toda atenção, ajuda e conhecimento passado ao longo do trabalho e do curso. Também ao meu co-orientador prof. Régis, pela participação no trabalho, exemplo profissional e transferência de conhecimentos ao longo de minha formação como pesquisador.

Ao Prof. Nelso, pelo exemplo de dedicação à docência e à pesquisa científica demonstrado ao longo de minha vida acadêmica, e pela participação na avaliação deste trabalho. Também ao prof. Mateus, pelas contribuições avaliativas neste trabalho e pelos conhecimentos compartilhados ao longo de minha vida acadêmica.

Aos colegas do LABSOLDA e do curso de Engenharia Mecatrônica do IFSC, que também muito ajudaram no desenvolvimento deste trabalho: Mário Cesar, João Facco, Elias Junior, Fernando Costenaro, Felipe Kalil, Cleber Marques, Luciano Cirino, Alberto Bonamigo e Hellinton Direne. Também para todos meus amigos que, de muitas formas, me inspiram e me aconselham ao longo da caminhada: Eduardo Bidese, Bruno Gevaerd, Renon Carvalho, Gabriel Costa, Daniel Lucio, Max Baranenko.

## RESUMO

Em algumas operações de soldagem, o principal objetivo consiste em aumentar a resistência de peças e estruturas frente a fenômenos específicos, revestindo as regiões expostas com materiais apropriados. Para esta finalidade, processos alimentados com consumíveis em pó, como o PTA-P, vem despertando interesse de empresários e pesquisadores brasileiros. Maior controlabilidade sobre aspectos geométricos e metalúrgicos das soldas tendem a conservar propriedades nobres dos materiais de revestimento, além de reduzir retrabalho em acabamento. Sobre outra perspectiva, o material de adição em forma de pó permite a elaboração de misturas experimentais, as quais se transformam na liga projetada após a solidificação da solda. Entretanto, os consumíveis apropriados ao processo PTA-P se restringem àqueles já empregados na indústria, compostos por partículas padronizadas quanto a forma e tamanho. Tais padrões garantem escoabilidade dos materiais compatível com os alimentadores de pó, ou ADP's comerciais. Estas restrições, por sua vez, vêm limitando prospecções em termos de processo e metalurgia, posto que, muitos dos pós imediatamente acessíveis, apresentam características genéricas. Tais fatores acabam por degenerar as propriedades de escoamento dos particulados, comprometendo a operacionalidade dos ADP's disponíveis. Diante disto, o presente trabalho aborda o desenvolvimento de um ADP com capacidade de operar também com pós de difícil escoamento. Perante testes operacionais, o dispositivo promoveu alimentação contínua de particulados genéricos e também de pós padronizados, ainda que com algumas interferências no fluxo de alimentação, originadas por imperfeições de fabricação do protótipo. Sujeito a procedimentos de calibração, o ADP não forneceu dosagem compatível com o projeto. Contudo, apresentou características de linearidade para todos os materiais testados, o que indica influência imperante dos recursos de controle sobre a taxa de alimentação. Por fim, também foram empreendidas operações de soldagem de revestimento com este ADP. Envolvendo um material padronizado e outro alternativo, os procedimentos consumaram a capacidade do protótipo em fornecer reprodutibilidade ao processo PTA-P, sem depender das propriedades granulométricas dos consumíveis aplicados.

**Palavras-Chave:** *Consumíveis em pó; Misturas experimentais; Difícil escoamento; Soldagem de revestimento.*

## ABSTRACT

In some welding operations, main objective is to increase parts and structures resistance to specific phenomena, covering exposed regions with suitable materials. For this purpose, processes feeded with powder consumables, just like PTA-P, have been attracting interest of entrepreneurs and researchers from Brazil. Better controllability over geometric and metallurgical weld aspects tends to preserve covering materials noble properties, in addition to reduce finishing reworks. Over another outlook, addition materials in powder form allows experimental mixtures elaboration, which desired alloy becomes after weld solidification. However, appropriate consumables of PTA-P process are restricted to those used in industries already, consisting in shape and size standardized particles. Such standards ensures materials flowability with comercial powder feeders (ADP's) compatible. These restrictions, in its turn, have been limiting prospects in process and metallurgy, since many immediately accessible powders presents generical characteristics. These factors ends up particulates flow properties degenerating, compromising available ADP's operability. In this view, the present work deals with the development of an ADP with capacity to operate also with hard flow powders. In operational tests, the device promoted continuous feeding of generical particulates and also of standardized powders, although with some interferences in the feed flow, originated by prototype manufacture imperfections. Subject to calibration procedures, ADP did not provide dosage compatible with the design. However, it presented linearity characteristics for all tested materials, which indicates a prevailing influence of the control resources over the feed rate. Finally, cladding welding operations were also undertaken with this ADP. Involving a standardized and an alternative material, procedures concretized prototype's ability to provide reproducibility to PTA-P process, no depending on granulometric properties of applied consumables.

**Palavras-Chave:** *Powder consumables; Experimental mixtures; Hard flow; Cladding welding.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática de sistema de alimentação de pó .....	17
Figura 2 – Aspectos de alimentação de pó em tocha PTA-P com injeção externa ...	17
Figura 3 – a) partículas atomizadas; b) fragmentos obtidos por trituração; c) padronização com faixa granulométrica entre 100 e 160 $\mu\text{m}$ .....	19
Figura 4 – escoabilidade de sólidos particulados: a) regimes de escoamento; b) procedimento de determinação de densidade aparente .....	20
Figura 5 – escoabilidade de sólidos particulados: a) defeito de escoamento por arco; b) defeito de escoamento por caminho de rato; c) medição de ângulo de empilhamento .....	21
Figura 6 – reservatórios para escoamento em massa: à esquerda silo com tremonha cônica; à direita com tremonha em forma de cunha .....	22
Figura 7 – ADP de Tambor Vertical: a) produto comercial e seu gabinete de controle; b) estrutura em corte frontal. Principais itens: 1- tambor vertical; 2- canal de descarga; 3- tremonha cônica; 11- conexão com linha pneumática .....	23
Figura 8 – Silhueta da pilha de pó formada entre o tambor e o canal de descarga do reservatório em função da altura indicada no canto superior esquerdo das imagens .....	24
Figura 9 – Alimentação problemática de pó alternativo: a) caminho de rato; b) arco; c) dispositivo excêntrico improvisado; d) defeito no revestimento .....	25
Figura 10 – Defeitos de escoamento no ADP de Tambor Vertical: a) caminho de rato em pó Triturado; b) caminho de rato em pó 316L Fino; c) entupimento por arco em operação com liga experimental .....	26
Figura 11 - ADP de válvula rotativa: a) vista superior da válvula rotativa; b) revestimento desgastado com partículas aderidas .....	27
Figura 12 – Simulação do comportamento de partículas em transporte por parafuso: a) partículas esféricas; b) ovais; c) cúbicas .....	27
Figura 13 – associação entre os mecanismos de esteira transportadora e tambor vertical .....	28
Figura 14 – técnicas de acionamento de motor de passo de ímã permanente .....	29
Figura 15 – Regimes de fluidização .....	31
Figura 16 – Princípios de funcionamento de alimentadores com mesma área de canal de descarga: a) Tambor Vertical; b) Esteira Transportadora .....	38
Figura 17 – Visão geral do ADP de Esteira: a) Dispositivo projetado em Solidworks; b) equipamento fabricado .....	39
Figura 18 – Reservatório de pó do ADP de Esteira Transportadora .....	40
Figura 19 – Perspectiva em corte da Tampa do ADP de Esteira Transportadora .....	42
Figura 20 – Tremonha do ADP de Esteira Transportadora: a) perspectiva isométrica da Tremonha; b) Canal de Descarga em perspectiva .....	43
Figura 21 – Fixadores e vedação do Reservatório do ADP de Esteira Transportadora .....	44
Figura 22 – Parâmetros geométricos considerados para cálculo do volume .....	45

Figura 23 – Mecanismo Manipulador em perspectiva com indicação dos principais componentes .....	46
Figura 24 – Vista explodida do Mecanismo Manipulador com numeração de componentes .....	47
Figura 25 – Sistema de transmissão da Esteira Transportadora: a) esteira com bordas flexíveis; b) fixação da polia motora por parafuso radial; c) vista frontal do sistema de transmissão da Esteira Transportadora .....	49
Figura 26 – Mecanismo esticador: a) movimento de aperto da correia; b) movimento de afrouxamento da correia .....	50
Figura 27 – parâmetros principais do projeto de dosagem: a) largura e espessura da dose; b) perímetro de dosagem .....	51
Figura 28 – Circuito de gás de arraste no ADP projetado .....	52
Figura 29 – Motor de Passo NEMA 23 KTC-HT23-397: a) imagem do motor; b) curva de relação entre torque e velocidade do motor .....	53
Figura 30 – Fonte DigiPlus A7 com periféricos essenciais à alimentação de pó no processo PTA-P .....	55
Figura 31 – <i>Driver</i> STR8: a) módulo encapsulado; b) funcionalidades .....	56
Figura 32 – Configuração de resolução de passo no <i>Driver</i> STR8 .....	57
Figura 33 – Telas do <i>display</i> da DigiPlus com funções e varáveis de configuração da taxa de alimentação no processo de soldagem .....	58
Figura 35 – Fotografias em MEV dos particulados adotados nos testes: a) Inox 316L Padrão; b) Inox 316L Fino; c) Ferro-Níquel .....	60
Figura 36 – Bancada de ensaios de calibração do ADP .....	62
Figura 37 – Bancada PTA-P do LABSOLDA - UFSC .....	63
Figura 38 – Escoamento desequilibrado no Reservatório .....	65
Figura 39 – Perfil da cortina de pó em função do acionamento: a) acionamento natural; b) acionamento com recurso Smooth .....	66
Figura 40 – Formação de pilhas de pó na Escotilha: a) Inox 316L Padrão; b) Ferro-Níquel; c) Inox 316L Fino .....	67
Figura 41 – Fluxo de pó em Transporte Pneumático .....	68
Figura 42 – curvas de calibração do ADP de Esteira Transportadora: a) taxa mássica; b) taxa volumétrica .....	70
Figura 43 – Operação de soldagem PTA-P com ADP de Esteira Transportadora e Pó Inox 316L Fino: a) Momento do procedimento; b) revestimento .....	72
Figura 44 – Operação de soldagem PTA-P com ADP de Esteira Transportadora e Pó Inox 316L Padrão: a) Momento do procedimento; b) revestimento .....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos e especificações do alimentador de pós alternativos.....	32
Tabela 2 – Lista de componentes do Reservatório.....	41
Tabela 3 – componentes do mecanismo manipulador.....	47
Tabela 4 – Principais características do Motor de Passo NEMA 23 KTC-HT23-397...	54
Tabela 5 – Principais propriedades dos pós adotados para os ensaios.....	59
Tabela 6 – Principais parâmetros de soldagem.....	64
Tabela 7 – 316L Fino.....	68
Tabela 8 – 316L Padrão.....	69
Tabela 9 – Ferro-Níquel.....	69

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADP – Alimentador de pó

B – Largura da cobertura do reservatório

b – Largura do canal de descarga do reservatório

CAD – Computer aided design

h – Altura do reservatório

l – Comprimento do canal de descarga do reservatório

$l_D$  – Largura da dose de pó

$m_d$  – Massa dosada por rotação completa da esteira transportadora

$m_f$  – Valor final de massa no cálculo da taxa de alimentação

$m_i$  – Valor inicial de massa no cálculo da taxa de alimentação

$\rho$  – Perímetro da esteira transportadora

PTA-A – Plasma de arco transferido alimentado com arame

PTA-P – Plasma de arco transferido alimentado com pó

$t_d$  – Intervalo de tempo de descida de rampa de pó

$t_f$  – Intervalo de tempo de final de alimentação

$t_i$  – Intervalo de tempo de início de alimentação

$t_s$  – Intervalo de tempo de subida de rampa de pó

$t_{mf}$  – Instante de tempo relacionado ao valor final de massa na taxa de alimentação

$t_{mi}$  – Instante de tempo relacionado ao valor inicial de massa na taxa de alimentação

$T_{xf}$  – Valor de rotação do motor no final da alimentação

$T_{xi}$  – Valor de rotação do motor no início da alimentação

$T_{xm}$  – Taxa mássica de alimentação de pó

$T_{xr}$  - Valor de rotação do motor em regime de alimentação

$T_{xv}$  - Taxa volumétrica de alimentação de pó

$V_D$  – Volume dosado por rotação completa da Esteira Transportadora

$V_R$  – Volume total do interior do reservatório

$\delta$  – Altura da dose de pó

$\rho_{ap}$  – Densidade aparente de materiais em pó

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	11
1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA .....	12
1.2 OBJETIVOS .....	13
<b>1.2.1 Objetivo Principal</b> .....	<b>13</b>
<b>1.2.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>13</b>
1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA .....	14
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	16
2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM PTA-P .....	16
2.2 MATERIAIS METÁLICOS EM PÓ.....	18
<b>2.2.1 Aspectos Morfológicos e Granulométricos</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2.2 Considerações Sobre Escoabilidade de Sólidos Particulados</b> .....	<b>19</b>
2.3 ASPECTOS TECNOLÓGICOS DE RESERVATÓRIOS .....	22
<b>2.3.1 Mecanismos de Manipulação para Tremonhas Cônicas</b> .....	<b>23</b>
<b>2.3.2 Mecanismos de Manipulação para Tremonhas em Forma de Cunha</b> .	<b>27</b>
2.4 TECNOLOGIA DE ACIONAMENTO POR MOTOR DE PASSO.....	28
2.5 TRANSPORTE PNEUMÁTICO.....	30
<b>3 PROJETO DO ADP DE ESTEIRA</b> .....	32
3.1 REQUISITOS E ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO .....	32
3.2 REQUISITOS DE PROJETO .....	32
<b>3.2.1 Ausência de interrupções permanentes</b> .....	<b>33</b>
<b>3.2.2 Ausência de variações instantâneas</b> .....	<b>33</b>
<b>3.2.3 Estanqueidade</b> .....	<b>33</b>
<b>3.2.4 Resistência ao desgaste</b> .....	<b>34</b>
<b>3.2.5 Limpeza</b> .....	<b>34</b>
<b>3.2.6 Portabilidade</b> .....	<b>34</b>
<b>3.2.7 Visibilidade</b> .....	<b>35</b>
3.3 ESPECIFICAÇÕES.....	35
<b>3.3.1 Reservatório com Tremonha em Cunha</b> .....	<b>35</b>
<b>3.3.2 Mecanismo Tipo Esteira Transportadora</b> .....	<b>36</b>
<b>3.3.3 O'Rings, Juntas e Adesivos</b> .....	<b>36</b>
<b>3.3.4 Formação Livre da Pilha de Pó</b> .....	<b>36</b>
<b>3.3.5 Acesso Facilitado a componentes Sujos</b> .....	<b>37</b>

<b>3.3.6</b>	<b>Peso e Volume .....</b>	<b>37</b>
<b>3.3.7</b>	<b>Aberturas Cobertas com Acrílico .....</b>	<b>37</b>
3.4	MODELO DE PROJETO.....	37
3.5	ASPECTOS GERAIS DO ADP DE ESTEIRA .....	39
<b>3.5.1</b>	<b>Reservatório .....</b>	<b>40</b>
3.5.1.1	Tampa .....	41
3.5.1.2	Tremonha .....	42
3.5.1.3	Fixadores.....	44
3.5.1.4	Capacidade Volumétrica do Reservatório .....	44
<b>3.5.2</b>	<b>Mecanismo Manipulador .....</b>	<b>45</b>
3.5.2.1	Mecanismo da Esteira Transportadora.....	48
3.5.2.2	Mecanismo Esticador .....	50
<b>3.5.3</b>	<b>Projeto de Dosagem .....</b>	<b>50</b>
<b>3.5.4</b>	<b>Circuito de Gás de Arraste.....</b>	<b>52</b>
3.6	ACIONAMENTO E CONTROLE DO ADP .....	53
<b>3.6.1</b>	<b>Motor do ADP .....</b>	<b>53</b>
<b>3.6.2</b>	<b>Fonte de Soldagem.....</b>	<b>54</b>
<b>3.6.3</b>	<b>Driver de Acionamento.....</b>	<b>55</b>
<b>3.6.4</b>	<b>Interface de Controle do ADP .....</b>	<b>57</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO ADP .....</b>	<b>59</b>
4.1	INSPEÇÃO OPERACIONAL.....	60
4.2	CALIBRAÇÃO .....	61
4.3	SOLDAGEM.....	62
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>65</b>
5.1	INSPEÇÃO OPERACIONAL.....	65
5.1.1	Comportamento do Pó no Reservatório .....	65
5.1.2	Comportamento do Pó no Mecanismo Manipulador .....	66
5.1.3	Comportamento do Pó em Transporte Pneumático .....	67
5.2	CALIBRAÇÃO .....	68
5.3	SOLDAGEM.....	71
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>74</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>76</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A soldagem, no que tange a fabricação e manutenção de estruturas mecânicas, evidencia-se como principal atividade. Além de proporcionar união, também é muito aplicada em reconstituição de componentes e revestimento de superfícies. Principalmente para este último fim, processos de soldagem, como *Plasma Transferred Arc with Powder* (PTA-P), tem mostrado vantagens singulares por aceitarem o material de adição em forma de pó. O PTA-P, dentre os processos de soldagem a arco aplicados industrialmente, proporciona baixos níveis de diluição [1,2], fator determinante para conservação de propriedades nobres do material de revestimento. Acabamento superficial regular [3,4] e controle de espessura da camada [5,6] são outras importantes características oferecidas. Sob outro aspecto, enquanto o arame exige extrema exatidão de posicionamento para manutenção dos padrões de transferência metálica, a alimentação com sólidos particulados permite maior facilidade de adição do material (embora com perdas consideráveis).

Na indústria, o processo PTA-P desempenha papel fundamental em atividades de fabricação e manutenção, contudo, as operações se restringem à deposição de poucos materiais. Ligas de aço Inox em geral, Inconel 625 e Stellite 6® abrangem a maior parte das aplicações, conferindo resistência a oxidação, altas temperaturas e desgaste a componentes mecânicos [7]. Os consumíveis, por sua vez, apresentam morfologia e faixa granulométrica padronizadas [8]. As partículas possuem formato aproximadamente esférico, com diâmetros que se distribuem entre 50 e 250 µm em uma mesma embalagem [9]. Além de adequar as propriedades de fusão do consumível aos níveis de energia típicos do processo, estas características garantem boa escoabilidade dos pós através de todo o sistema de alimentação, facilitando o aporte e favorecendo bons resultados [1].

A adição de pó neste processo é efetuada por dispositivos chamados alimentadores de pó, ou ADP's. Basicamente, são dotados de um reservatório (para estocagem do consumível de soda), um mecanismo manipulador (para dosagem) e uma linha pneumática (para transporte do pó). Existem diversos modelos comerciais, compostos por diferentes princípios mecânicos. São dimensionados para operação com os materiais padronizados para PTA-P, visando atendimento às demandas industriais.

## 1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

As aplicações restritas do PTA-P na indústria, em termos de materiais, acabam por disponibilizar um número reduzido de consumíveis padronizados no mercado. Tais fatos acarretam na existência de poucos fabricantes em todo mundo. No Brasil, os fornecedores tornam-se ainda mais raros forçando, muitas vezes, a aquisição via importação [7,10].

Mesmo assim, as possibilidades fornecidas pelo PTA-P, em termos de resultados de soldagem vem, cada vez mais, chamando a atenção da indústria brasileira. Contudo, as dificuldades de aquisição de consumíveis padronizados, aliada à disponibilidade imediata de pós alternativos, acabam por incentivar aplicações, mesmo gerando condições de alimentação atípicas [11]. Outra circunstância remete ao fato de o processo PTA-P, por ser alimentado com pó, viabilizar obtenção de ligas especiais por soldagem, resultantes da fusão de misturas experimentais pré-formuladas. Neste último caso, o PTA-P é visto como uma importante ferramenta científica na área de metalurgia. Todavia, a grande maioria de opções de sólidos particulados é fornecida comercialmente sem controle granulométrico ou morfológico apropriados [10,12].

Perante estas condições, empresários e pesquisadores tem procurado o LABSOLDA (laboratório de soldagem da UFSC), em busca de soluções para soldagem com materiais alternativos. Entretanto, as diferenças em relação aos padrões em termos de dimensões e geometrias de partículas afetam, de forma intensa, a escoabilidade dos pós no interior dos ADP's comerciais. Por conta disto, estes encontram sérias dificuldades para realizar a alimentação, as quais se refletem em defeitos nos revestimentos, quando não interrompem prematuramente a alimentação do processo de soldagem [10,11,12].

Honrando sua filosofia de suprir continuamente a indústria e pesquisa nacionais com soluções, em termos de recursos tecnológicos e ciência em processos de soldagem, o LABSOLDA vem enfrentando este obstáculo. Em ocasião de desenvolvimento de um material de alta resistência a cavitação e seu respectivo procedimento de soldagem, foi concebido um ADP para operação com pós alternativos [13]. Contudo, tal equipamento não proporcionou robustez satisfatória na manipulação destes materiais [14]. Desta vez, com o consentimento do Instituto

Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC), o LABSOLDA mantém sua responsabilidade, buscando alcançar os objetivos abordados a seguir.

## 1.2 OBJETIVOS

Perante a problemática supracitada, o presente trabalho busca alcançar os objetivos relatados a seguir.

### 1.2.1 Objetivo Principal

Em decorrência da ineficiência dos alimentadores de pó quando em operação com materiais alternativos, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um novo modelo de ADP. Este deve ser capaz de operar com materiais em pó de difícil escoamento, oferecendo plenas condições de soldagem em relação a continuidade e controle do fluxo de pó.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo principal deste trabalho, será necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- Projetar e fabricar um reservatório que favoreça o escoamento livre de materiais em pó, sem depender de características morfológicas e granulométricas das partículas;
- Projetar e fabricar um mecanismo manipulador de pó apropriado ao reservatório desenvolvido, apto a fornecer regulagem da taxa de alimentação dos pós e fluxo contínuo;
- Selecionar elementos de acionamento compatíveis com os recursos de controle já disponíveis na fonte de soldagem, visando integração harmônica com o sistema PTA-P existente.

Por fim, como métodos de avaliação do dispositivo desenvolvido:

- Realizar inspeção operacional buscando observar o comportamento do material em pó, quando submetido ao funcionamento do dispositivo em termos de escoamento, manipulação e transporte de partículas;
- Executar ensaios de calibração, afim de caracterizar a taxa de alimentação de pó em função do acionamento do mecanismo, além de conhecer suas limitações operacionais;
- Empreender operações de soldagem com materiais alternativos e padronizados, visando mostrar o desempenho do ADP desenvolvido em forma de resultado concreto.

### 1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

É fato que o desenvolvimento humano, em muitos aspectos, é fruto de progressos científicos, sobretudo, no que tange a avanços no setor industrial. Neste contexto, a soldagem, em geral, inclui-se como um dos ramos dependentes de contínuas evoluções. Principalmente no Brasil, um país ainda em desenvolvimento, onde grandes estruturas e plantas industriais (sem mencionar toda demanda das linhas de produção fabris) são construídas em grande número e prazos cada vez mais curtos [15]. Estes fatores criam uma série de desafios que, habitualmente, são superados somente com auxílio de mão de obra e maquinário estrangeiros [16,17]. Entretanto, tais soluções, embora eficazes, costumam ser onerosas, além de favorecer uma cultura de dependência. No combate a estes obstáculos, o trabalho aqui proposto pode ser considerado como promissor ao progresso da soldagem nacional, em termos de ciência e tecnologia.

No âmbito da ciência, o dispositivo pode oferecer melhores condições para pesquisas, tanto em metalurgia da soldagem, quanto ao próprio processo PTA-P. Em pesquisas metalúrgicas, o alimentador pode permitir soldas de melhor qualidade em operação com misturas experimentais, formuladas para obtenção de materiais inéditos como resultado do processo. Quanto ao PTA-P, a possibilidade de alimentação de consumíveis em novos padrões podem estender os horizontes de pesquisa do próprio processo de soldagem. Neste sentido, pode-se adequar a

distribuição granulométrica em função da energia utilizada, como já proposto na literatura especializada [18].

No que tange à tecnologia, este desenvolvimento pode, futuramente, agraciar o mercado interno com um equipamento genuinamente brasileiro. Neste sentido, pode ser facilitada a aquisição de um dispositivo que flexibiliza o processo PTA-P, em relação aos consumíveis de solda. Como efeitos positivos, a maior independência de padrões morfológicos e granulométricos pode ampliar as alternativas de materiais em pó, garantindo bons resultados em soldagem, mesmo com materiais hoje julgados inapropriados ao processo.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo almeja contextualizar a problemática, relatada no capítulo anterior, no âmbito do processo PTA-P. Além disto, serão abordados aspectos fundamentais para o desenvolvimento do ADP. Inicialmente, sentiu-se necessidade de realizar pesquisas sobre escoabilidade de pós metálicos e suas relações com as propriedades morfológicas e granulométricas das partículas que os compõem. Mais adiante, a fundamentação foi estendida a considerações sobre o ADP adotado atualmente pelo LABSOLDA, além de uma abordagem sobre a tecnologia de acionamento por motores de passo.

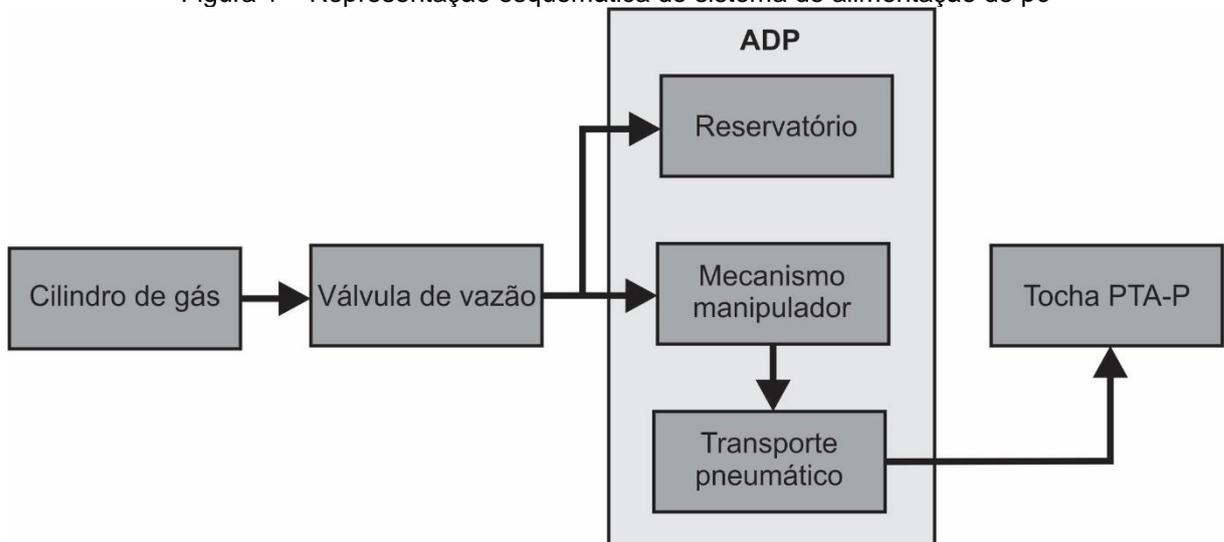
### 2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM PTA-P

A sigla PTA refere-se a seu nome em inglês: *Plasma Transferred Arc*. Uma vez que, tal processo é alimentado com pó, foi sugerida a nomenclatura PTA-P [19]. O processo de soldagem PTA-P é comumente aplicado para produção de revestimentos metálicos em regiões de componentes mecânicos (constituídos de aços comuns) com ligas especiais resistentes a fenômenos específicos. A alimentação de pó no processo PTA-P é efetuada por um sistema de alimentação composto, por sua vez, de um cilindro de gás, uma válvula controladora de vazão, o ADP e a própria tocha PTA-P. A Figura 1, esquematiza o sistema de alimentação e ilustra o circuito de gás no sistema, com seta indicando o sentido de fluxo.

O cilindro é a fonte de gás, geralmente argônio, que realiza o transporte pneumático das partículas do ADP para a tocha PTA-P. Devido a sua função, este gás é chamado gás de arraste. A válvula de vazão realiza o controle (válvula microcontrolada) de fluxo de gás de arraste, uma vez que a estabilidade do processo é sensível a vazão deste. O ADP, por sua vez, consiste em um dispositivo capaz de armazenar, manipular e transportar o consumível particulado. É dotado de um reservatório, cuja função é comportar e escoar o pó necessário à operação de soldagem. Este possui também um mecanismo manipulador (motorizado), o qual dosa o pó com vazão adequada ao processo. O gás proveniente da válvula de vazão, é inserido, tanto no reservatório, quanto no mecanismo manipulador, objetivando a equalização da pressão interna do ADP e o expurgo do ar atmosférico. Enfim, dispõem

de uma linha de transporte pneumático, a qual direciona as partículas de pó para a tocha PTA-P, com auxílio do gás de arraste.

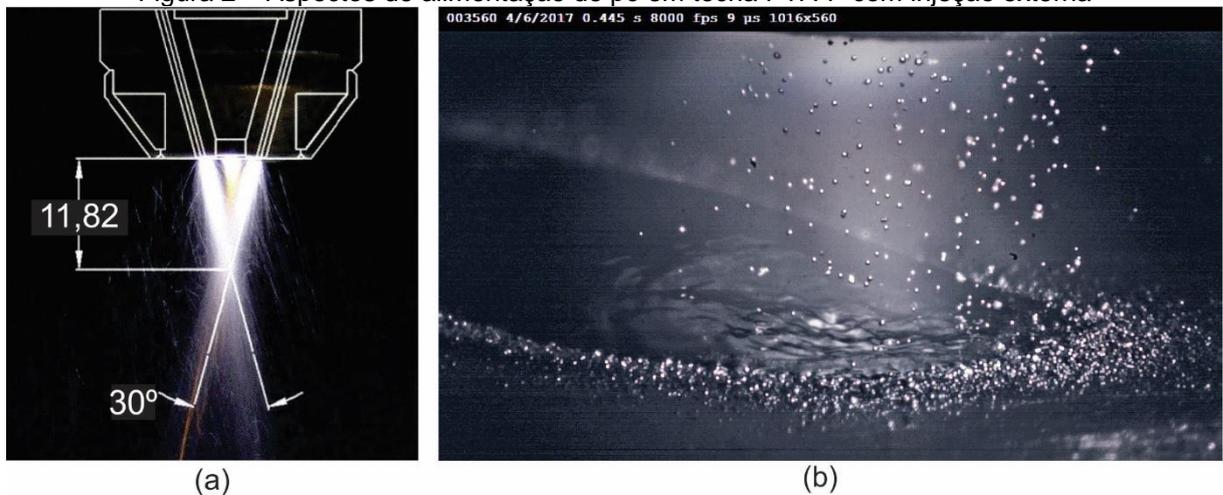
Figura 1 – Representação esquemática de sistema de alimentação de pó



Fonte: Elaboração própria.

O bico da tocha PTA-P do LABSOLDA dispõe de canais de injeção de pó. Os jatos se encontram em um ponto focal coincidente no interior do arco, à aproximadamente 12 mm da face do bico, como mostrado na Figura 2 (a) [7]. Assim, as partículas caem sobre a poça de fusão em forma de gotículas, como ilustra a Figura 2 (b).

Figura 2 – Aspectos de alimentação de pó em tocha PTA-P com injeção externa



(a)

(b)

Fontes: a) Silva (2010); b) elaboração própria.

## 2.2 MATERIAIS METÁLICOS EM PÓ

Este tópico aborda as características morfológicas e granulométricas de materiais metálicos em pó, associando-as a características de escoabilidade. Defeitos de escoamento e suas relações com aspectos tecnológicos de reservatórios também serão comentados a seguir.

### 2.2.1 Aspectos Morfológicos e Granulométricos

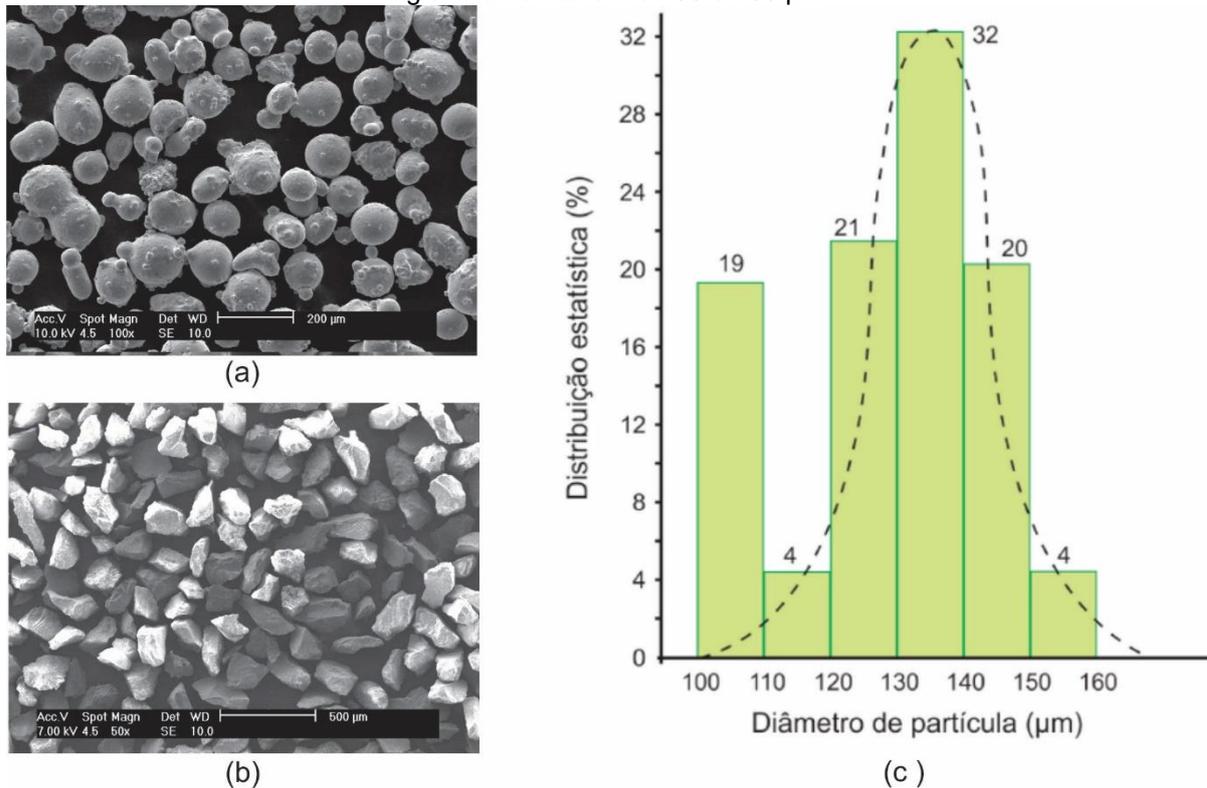
Em função de propriedades físico-químicas de metais puros e ligas, existem diversos processos industriais para fabricação de pós metálicos. Os mais expressivos no mercado são a atomização e a trituração.

O processo mais utilizado em produção de sólidos particulados para aplicações gerais é a atomização. Neste processo, um fluxo de metal líquido é atingido por um jato de gás, água ou óleo sob pressão, produzindo partículas em formato de esferas ou elipsoides [20]. A Figura 3 (a), mostra a morfologia de um grupo de partículas produzidas por atomização. A trituração, por sua vez, fraciona blocos sólidos do material empregando esferas, rolos, martelos ou mandíbulas. Os fragmentos produzidos por esta técnica não possuem forma definida, apresentando extremidades angulares e superfícies escarpadas [20]. Como exemplo, a Figura 3 (b), mostra a morfologia de um grupo de partículas produzidas por trituração.

Os pós tradicionalmente empregados no processo de soldagem PTA-P passam por um processo de padronização. Uma quantidade é dividida em várias porções de diferentes faixas granulométricas. Na sequência, estas porções são novamente reunidas, com quantidades e tamanhos controlados, de modo a formar uma distribuição normal [21]. A Figura 3 (c), ilustra a padronização descrita.

Na literatura, são encontradas diferentes faixas granulométricas aconselhadas para a soldagem de ligas ferrosas por PTA-P. Os limites de distribuição recomendados, estão em um mínimo de 45  $\mu\text{m}$  e 250  $\mu\text{m}$ . Estes valores são recomendados por questões térmicas, uma vez que partículas menores vaporizam facilmente e partículas maiores, por sua vez, mostram-se de difícil fusão.

Figura 3 – a) partículas atomizadas; b) fragmentos obtidos por trituração; c) padronização com faixa granulométrica entre 100 e 160  $\mu\text{m}$



Fontes: a) elaboração própria; b) elaboração própria; c) Marconi (2002).

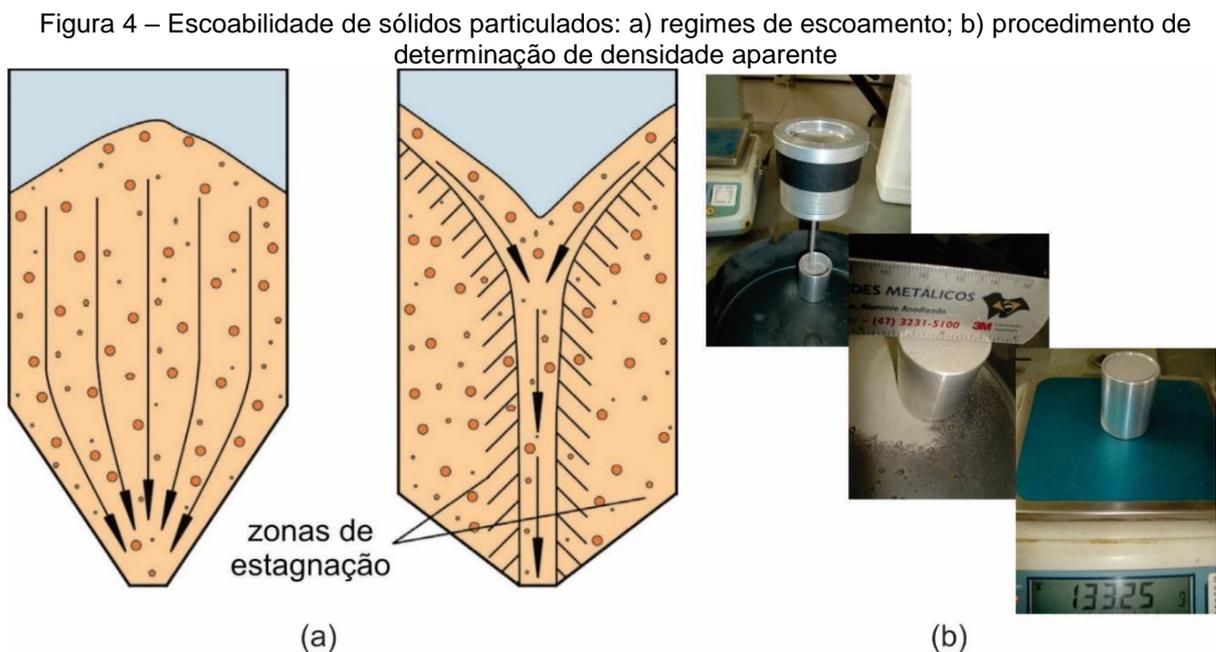
### 2.2.2 Considerações Sobre escoabilidade de Sólidos Particulados

A padronização dos consumíveis em pó para o processo PTA-P não leva em consideração apenas as propriedades térmicas das partículas. É necessário que os materiais apresentem escoabilidade compatível com os alimentadores de pó disponíveis. A escoabilidade, expressão que se refere a capacidade de fluir que um pó apresenta, não resulta somente das propriedades físicas e químicas do material que afetam o seu escoamento, mas também do equipamento usado para estocar ou manipular o particulado [22].

Enquanto um silo é descarregado, dois padrões de escoamento podem suceder, o escoamento em massa e o escoamento em funil [23]. O escoamento em massa, ilustrado na Figura 4 (a) à esquerda, ocorre quando todas as partículas contidas no reservatório se movem durante o esvaziamento. Já no escoamento em funil, representado na Figura 4 (a) à direita, a porção alinhada com a saída do reservatório entra em escoamento, enquanto a porção lateral permanece estagnada até que as partículas sejam expostas à superfície livre. O escoamento em massa

consiste em um regime mais robusto, menos susceptíveis aos defeitos de escoamento que serão vistos mais adiante [23].

As principais propriedades dos sólidos particulados que determinam o padrão de escoamento são a fricção e a densidade aparente [24], considerando um silo com determinado ângulo de afunilamento e diâmetro do canal de descarga. A densidade aparente é definida pelo volume ocupado por uma massa de pó não compactada. Esta definição está atrelada a procedimentos e aparatos normatizados [13,20]. A Figura 4 (b), apresenta as etapas básicas de determinação de densidade aparente. As principais propriedades dos sólidos particulados que influenciam na densidade aparente são a composição química, a morfologia das partículas e suas dimensões [20].



Fontes: a) Schulze (2008), adaptado; b) Alves (2011), adaptado.

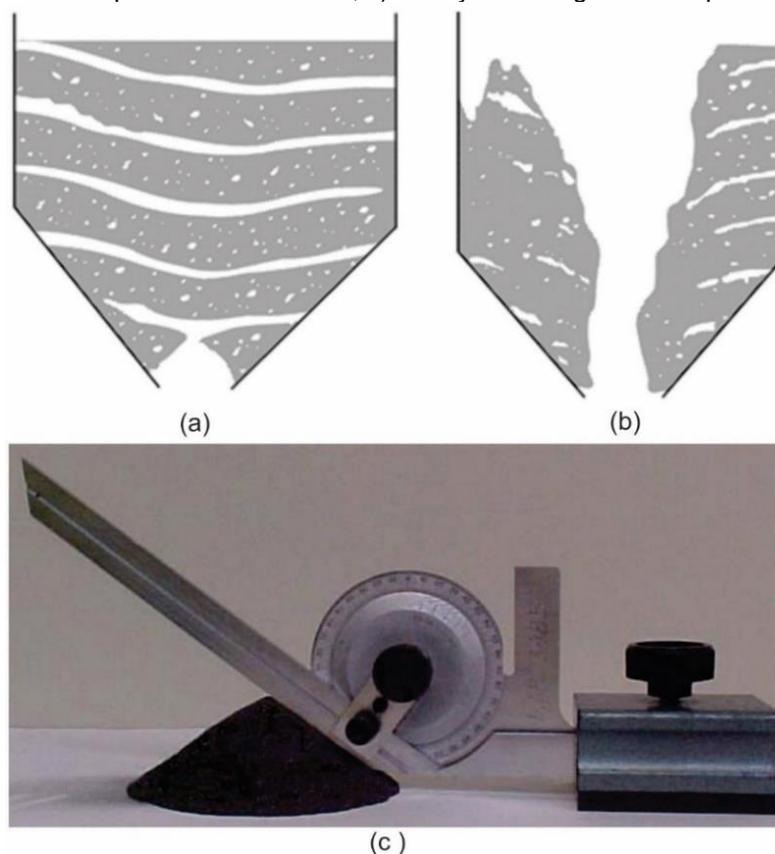
Devido a coesividade entre as partículas, defeitos de escoamento como o arco e o caminho de rato podem se formar no decorrer da descarga. Um arco, ilustrado na Figura 5 (a), também chamado de cúpula ou ponte, é uma obstrução que se forma logo acima do canal de descarga. Neste caso, as partículas se mantêm coesas, impedindo a queda uma das outras e suportando o peso de todo o material restante. Já o caminho de rato, representado na Figura 5 (b), caracteriza-se por um defeito em forma de canal vertical que se estende da superfície do material estocado até o canal

de descarga do silo. Tal canal é formado pelo esvaziamento da coluna acima do canal de descarga, sendo que, o restante do material permanece estagnado no reservatório até que um agente externo provoque uma avalanche [20].

Quando o material não é padronizado, pode-se conseguir a escoabilidade desejada por meio de um dimensionamento adequado de projeto do reservatório. Além da rugosidade das paredes, aspectos como ângulo de afunilamento, dimensões e geometria do canal de descarga são determinantes para obter o regime adequado de escoamento e isenção de defeitos.

A inclinação das paredes do funil pode ser determinada pela medição do ângulo de empilhamento do pó. Este é definido pelo ângulo formado entre a superfície livre de uma pilha de pó e o plano horizontal, resultante da organização espacial das partículas perante a ação gravitacional. Existem três procedimentos normatizados para determinação do ângulo de empilhamento: o método da injeção, o método da descarga e o método da inclinação [25]. A Figura 5 (c) demonstra um procedimento de medição do ângulo de empilhamento de sólido particulado [10].

Figura 5 – Escoabilidade de sólidos particulados: a) defeito de escoamento por arco; b) defeito de escoamento por caminho de rato; c) medição de ângulo de empilhamento



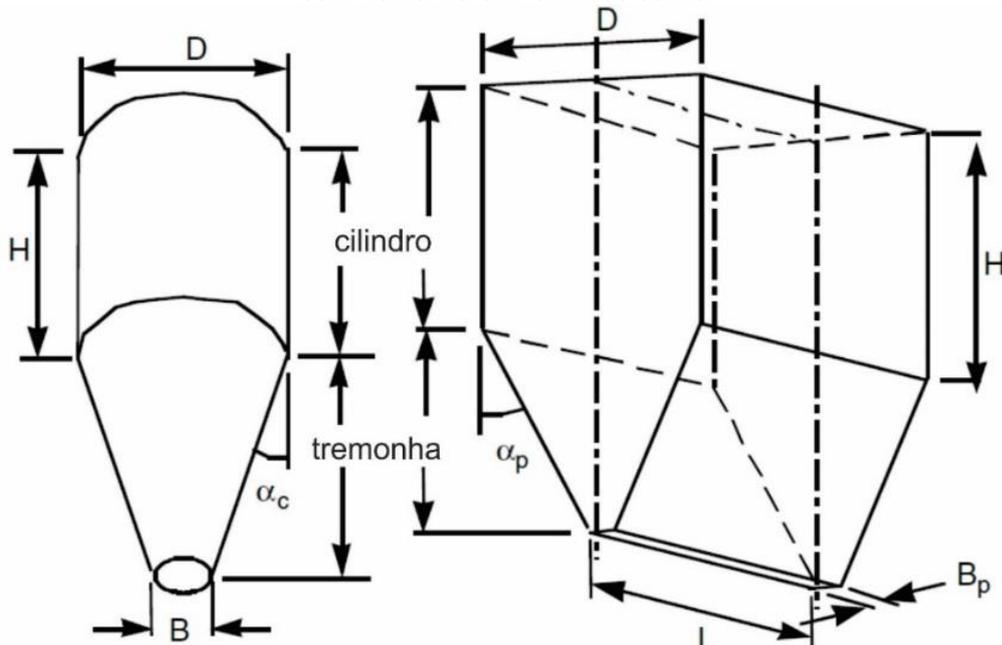
Fonte: a) ASM Handbook (1998); b) ASM Handbook (1998); c) Ribeiro (2007).

### 2.3 ASPECTOS TECNOLÓGICOS DE RESERVATÓRIOS

Os reservatórios, ou silos, são recipientes com a finalidade de estocar o sólido particulado, além de escoá-lo com determinado padrão em direção ao mecanismo de manipulação. As características fundamentais deste componente que ditam o perfil de escoamento são o canal de entrada, a rugosidade da superfície interna, o formato geométrico da estrutura e o canal de descarga. As duas últimas citadas figuram como as mais influentes sobre o padrão de escoamento, motivadoras da origem de diversos tipos de silos.

Os reservatórios para fluxo de massa são classificados pela forma da tremonha e pelo perfil de escoamento desejado. Os dois tipos principais de tremonha são as cônicas, que operam com fluxo simétrico em torno do eixo, e tremonhas em forma de cunha, nas quais ocorre o fluxo no plano. Esta última garante fluxo em massa mesmo com ângulos de inclinação maiores (em relação ao eixo vertical) podendo, por esta razão, apresentar maior capacidade de estocagem. Em contrapartida, apresenta cantos vivos, regiões em que os padrões de escoamento podem diferir dos perfis almejados em projeto. Contudo, este problema pode ser minimizado pelo canal de descarga alongado que este modelo de tremonha apresenta. A Figura 6 ilustra os dois tipos de reservatórios para fluxo de massa comentados [26].

Figura 6 – reservatórios para escoamento em massa: à esquerda silo com tremonha cônica; à direita com tremonha em forma de cunha



Fonte: McGlinchey (2005)

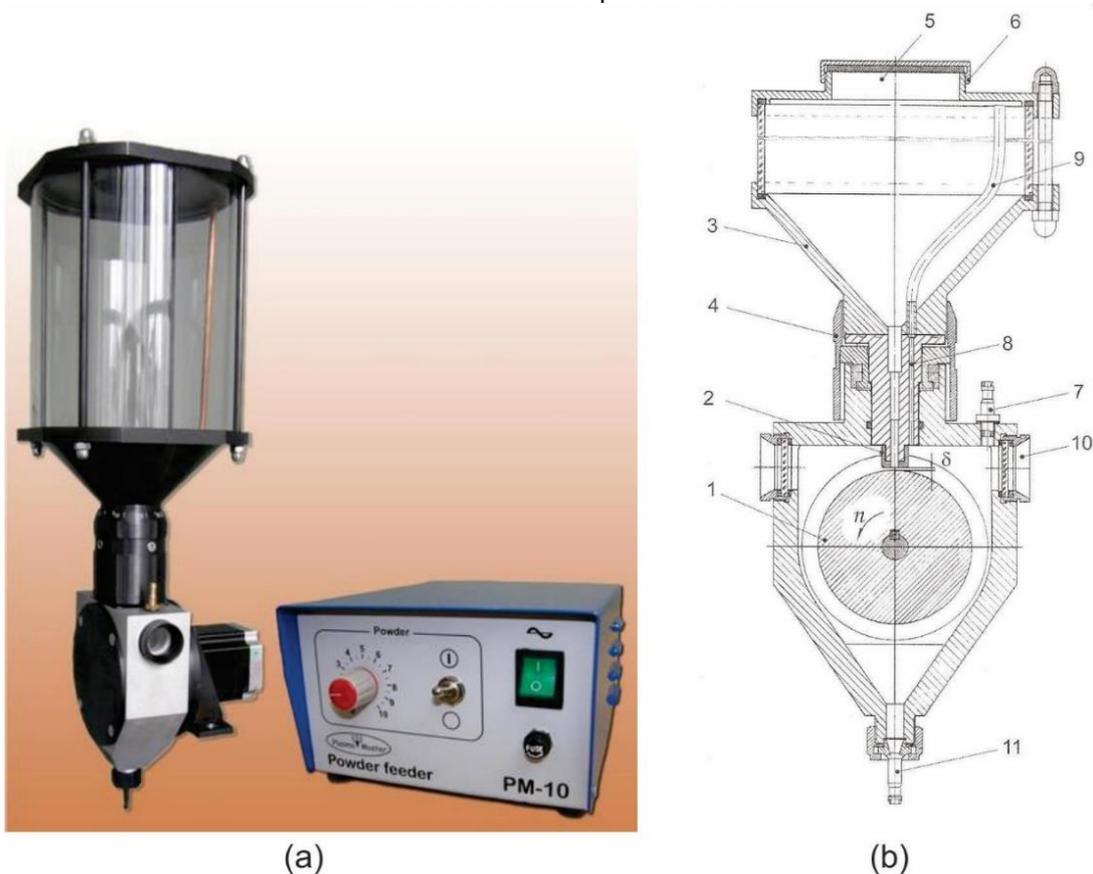
Embora qualquer princípio mecânico de alimentação de sólidos particulados possa operar em conjuntos com reservatórios de fluxo de massa, a literatura aconselha adequar o tipo de mecanismo de manipulação ao formato do reservatório adotado [24,25,26,27].

### 2.3.1 Mecanismos de Manipulação para Tremonhas Cônicas

No caso de adoção de reservatório de fluxo de massa com tremonha cônica, são mais indicados os princípios mecânicos do tambor vertical e da válvula rotativa.

Atualmente a bancada de soldagem PTA-P do LABSOLDA conta com um ADP do tipo Tambor Vertical [28], detalhado na Figura 7. Trata-se de uma variação dos alimentadores tipo esteira transportadora, largamente utilizados nas indústrias agrícolas para manipulação de grãos, entre outros ramos.

Figura 7 – ADP de Tambor Vertical: a) produto comercial e seu gabinete de controle; b) estrutura em corte frontal. Principais itens: 1- tambor vertical; 2- canal de descarga; 3- tremonha cônica; 11- conexão com linha pneumática

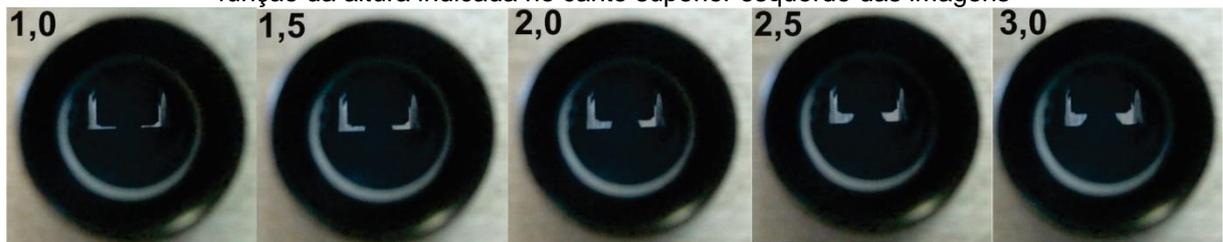


Fonte: a) Plasmamaster (2018); b) Plasmamaster (2018).

Neste equipamento, um tambor circular revoluciona verticalmente e desloca uma pilha de pó, a qual se forma continuamente sobre este ao escoar de um reservatório de tremonha cônica. O material deslocado cai sobre um funil, ao qual está conectada a mangueira de transporte pneumático. Através desta, as partículas são direcionadas para a tocha PTA-P com auxílio do gás de arraste.

Há também um nônio que permite regulagem da altura da pilha de pó ( $\delta$ ), correspondente a distância entre o tambor e o canal de descarga, como mostrado na Figura 8. Este recurso funciona como ajuste grosseiro. Assim, se a previsão é de altas taxas de alimentação, por exemplo, deve-se regular o nônio em uma posição mais alta e regular a taxa de alimentação via rotação do tambor. Este, por sua vez, é acionado via motor de passo, assim como a maioria dos outros tipos de alimentadores disponíveis comercialmente.

Figura 8 – Silhueta da pilha de pó formada entre o tambor e o canal de descarga do reservatório em função da altura indicada no canto superior esquerdo das imagens



Fonte: Alves (2011).

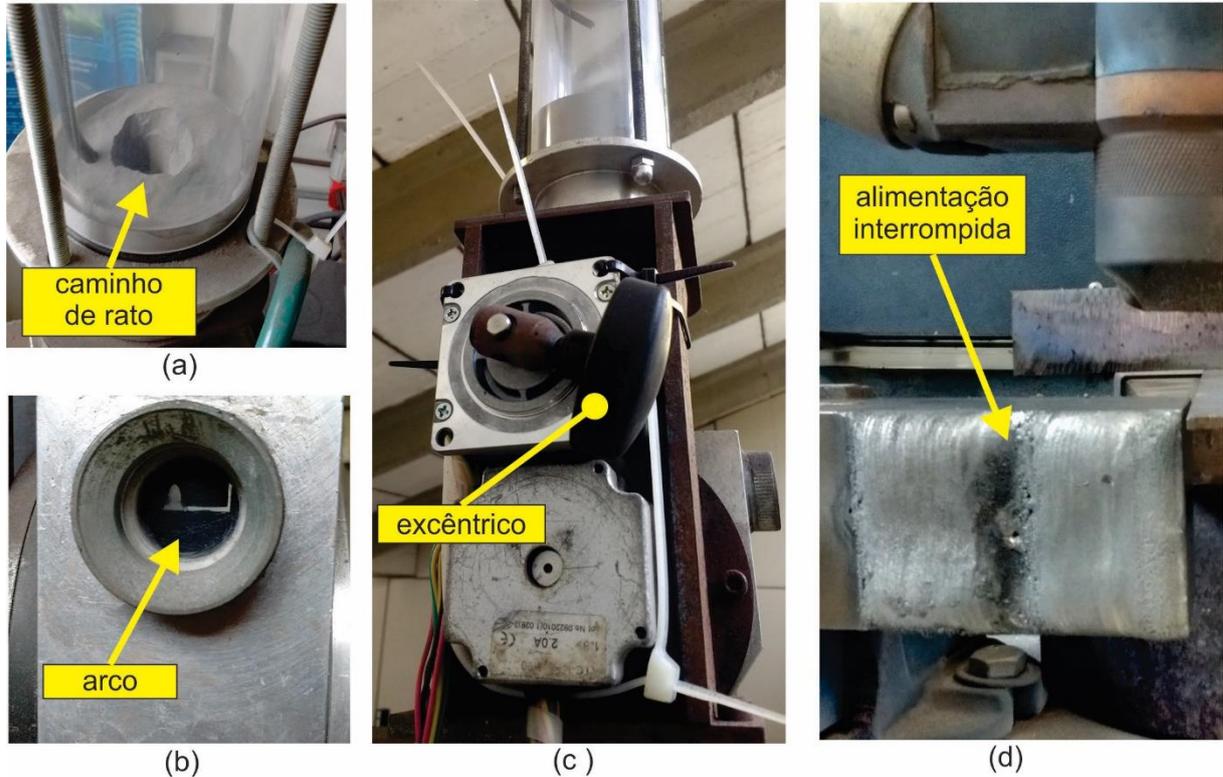
Uma indústria brasileira, especializada em revestimentos contra desgastes, ao informa-se sobre as pesquisas desenvolvidas pelo LABSOLDA acerca do processo PTA-P, procurou o laboratório. O motivo consistiu em aplicar materiais em pó experimentais, disponíveis na empresa, no revestimento de componentes de uma máquina de moer ossos de animais.

Entretanto, os materiais fornecidos pela empresa eram compostos por partículas de faixa e distribuição granulométrica discordantes dos padrões PTA-P. Em função disto, o desempenho do ADP foi comprometido, tornando a alimentação do processo problemática. A Figura 9 apresenta alguns aspectos do procedimento.

A principal tendência era a ocorrência de caminho de rato, como mostrado na Figura 9 (a). O entupimento por arco, na Figura 9 (b), passou a ocorrer em menor frequência, quando a alimentação foi forçada pela vibração do ADP com um dispositivo excêntrico improvisado, na Figura 9 (c). Ainda assim, os revestimentos

foram concluídos com interrupções permanentes na alimentação, produzindo descontinuidades como a apresentada na Figura 9 (d).

Figura 9 – Alimentação problemática de pó alternativo: a) caminho de rato; b) arco; c) dispositivo excêntrico improvisado; d) defeito no revestimento



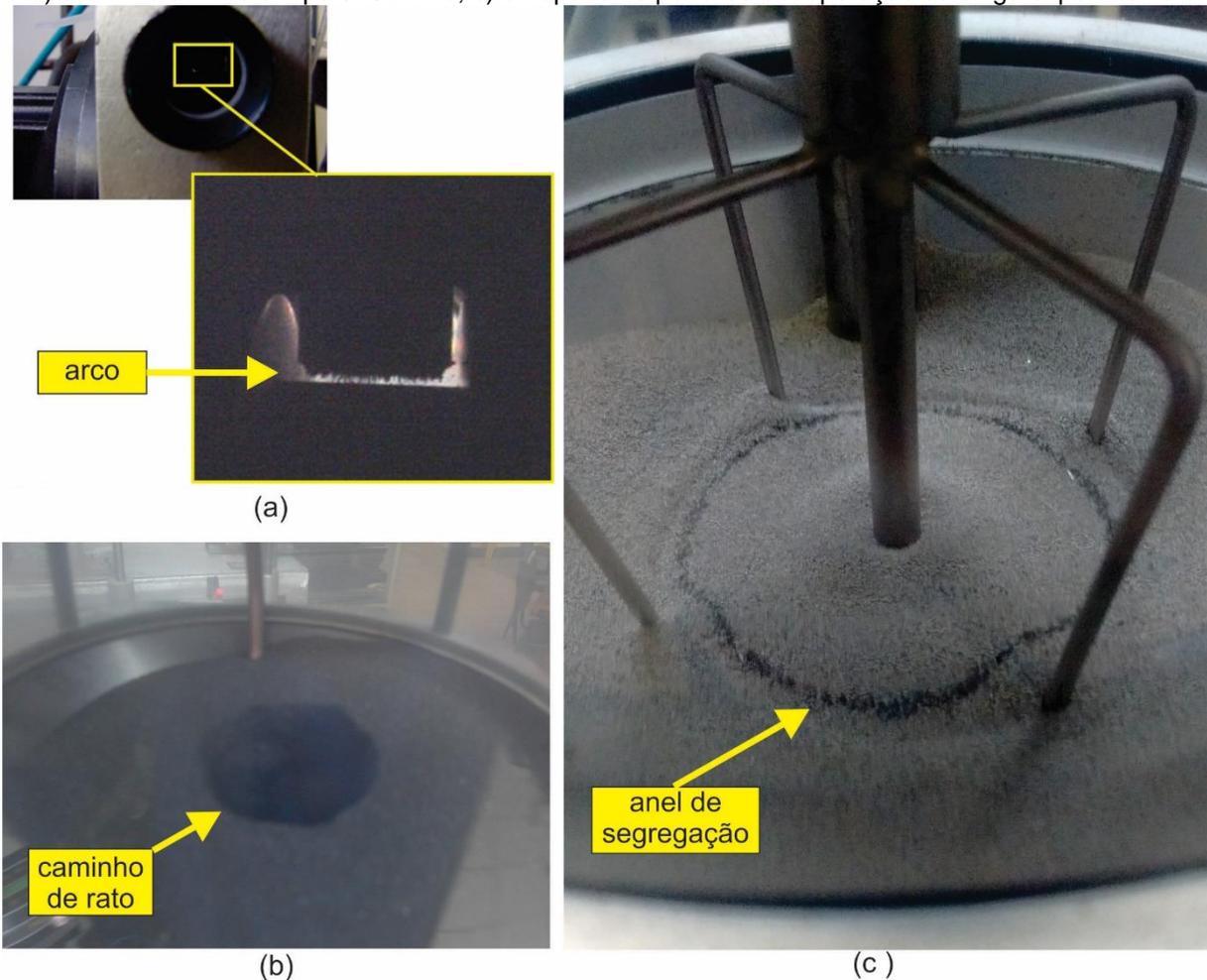
Fonte: Alves (2017).

Em ocasião de desenvolvimento de uma liga de alta resistência à cavitação, para aplicação em turbinas hidráulicas, misturas experimentais foram formadas com base em materiais triturados [10,12].

As atividades de soldagem, para obtenção de corpos de prova compostos pela liga resultante, foram conduzidas com sérias dificuldades de alimentação. A Figura 10 expõe os problemas enfrentados. Como mostrado nas Figuras 10 (a) e (b), defeitos de escoamento tipo arco e caminho de rato ocorriam com frequência, gerando interrupções do procedimento e descontinuidades nos corpos de prova.

Em caso de misturas experimentais, a indução de escoamento por meios mecânicos mostrou-se nociva. A Figura 10 (c) ilustra um caso em que um agitador foi utilizado em alimentação de uma mistura heterogênea. Pode-se observar que a agitação modificou a distribuição de partículas no pó, formando um anel de segregação na região movimentada.

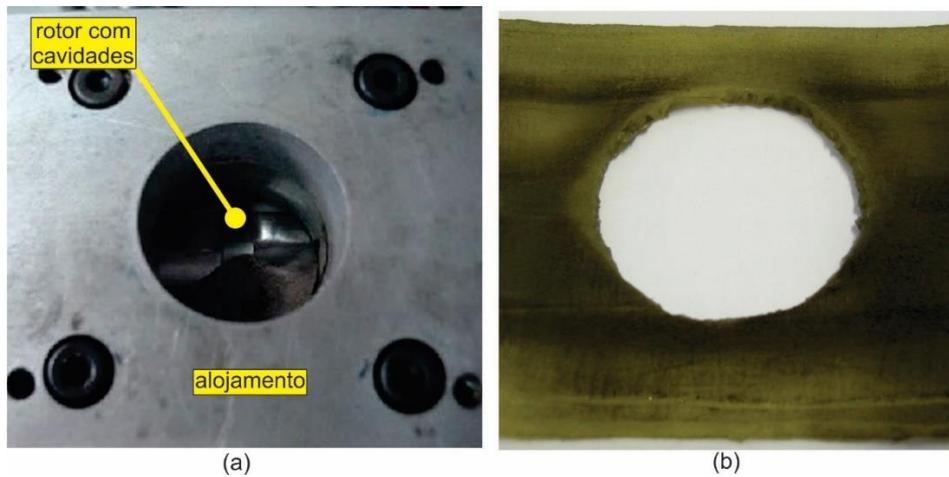
Figura 10 – Defeitos de escoamento no ADP de Tambor Vertical: a) caminho de rato em pó Triturado; b) caminho de rato em pó 316L Fino; c) entupimento por arco em operação com liga experimental



Fonte: Fayal (2010).

Um ADP de válvula rotativa foi desenvolvido pelo LABSOLDA, dedicado à alimentação de pós com padrões discordantes dos tradicionalmente usados no processo PTA-P [13]. Como ilustra a Figura 11 (a), este princípio é formado por um rotor dotado de cavidades que rotaciona no interior de um alojamento. As cavidades coletam as partículas que escoam do reservatório e as despejam na linha de transporte pneumático. Embora a válvula rotativa contasse com um revestimento de alta resistência ao desgaste, mostrado na Figura 11 (b), este não se mostrou eficiente ao operar com pós compostos por partículas irregulares. Além de sofrer desgaste e aderência de partículas, o revestimento, de forma imprevisível, movia-se no interior do mecanismo e causava o travamento do dispositivo [14].

Figura 11 - ADP de válvula rotativa: a) vista superior da válvula rotativa; b) revestimento desgastado com partículas aderidas



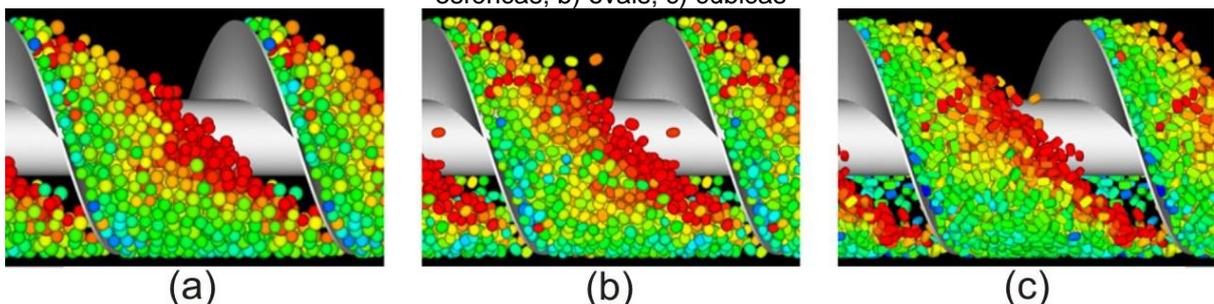
Fontes: Alves et al. (2015).

### 2.3.2 Mecanismos de Manipulação para Tremonhas em Forma de Cunha

Já para o caso de adoção de reservatório para fluxo de massa com tremonha em forma de cunha, a literatura aconselha os princípios mecânicos do fuso horizontal e de esteira transportadora [26,27].

Na fase inicial, um ADP de fuso horizontal integrava a bancada PTA-P do LABSOLDA [19]. Contudo, principalmente em baixas velocidades, era possível constatar visualmente que o fluxo de pó se apresentava em forma pulsada, quase intermitente [13]. Na literatura há afirmações, baseadas em simulação, indicando que este comportamento é uma tendência natural na alimentação por parafuso, independente do formato dos fragmentos [29]. A Figura 12 ilustra que as partículas tendem a se empilhar nas paredes das roscas, formando uma alimentação em “pacotes”.

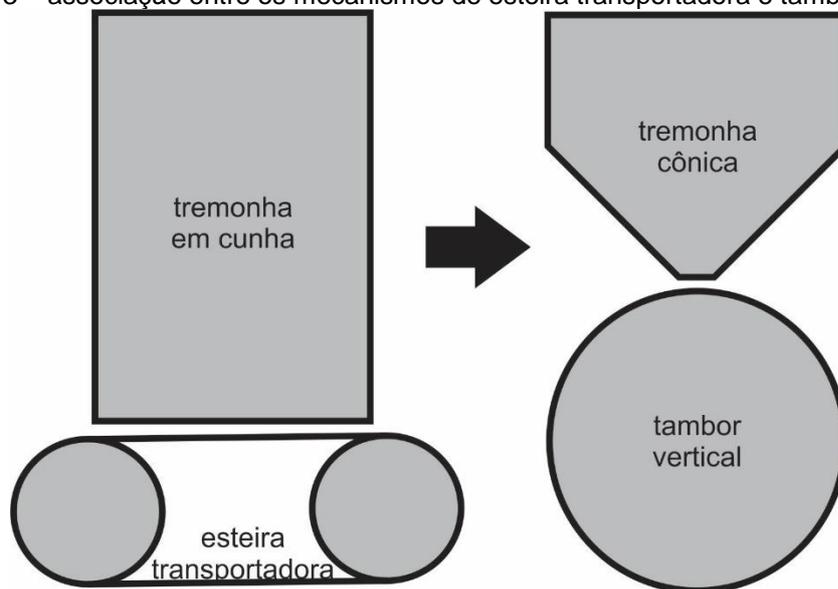
Figura 12 – Simulação do comportamento de partículas em transporte por parafuso: a) partículas esféricas; b) ovais; c) cúbicas



Fonte: Owen et al. (2013).

O princípio mecânico de manipulação de sólidos particulados por esteira transportadora também são apropriados para operação em conjunto com reservatório em forma de cunha. A região plana da esteira é capaz de estabilizar uma pilha de pó fornecida por um canal de descarga alongado. Como será visto no próximo capítulo, este mecanismo foi o escolhido para integrar o ADP desenvolvido neste trabalho. É deste princípio que deriva o ADP de Tambor vertical, como sugere a Figura 13. Neste caso, a esteira tomou forma circular para facilitar a construção e se adequar à operação em conjunto com uma tremonha cônica.

Figura 13 – associação entre os mecanismos de esteira transportadora e tambor vertical



Fonte: Elaboração própria.

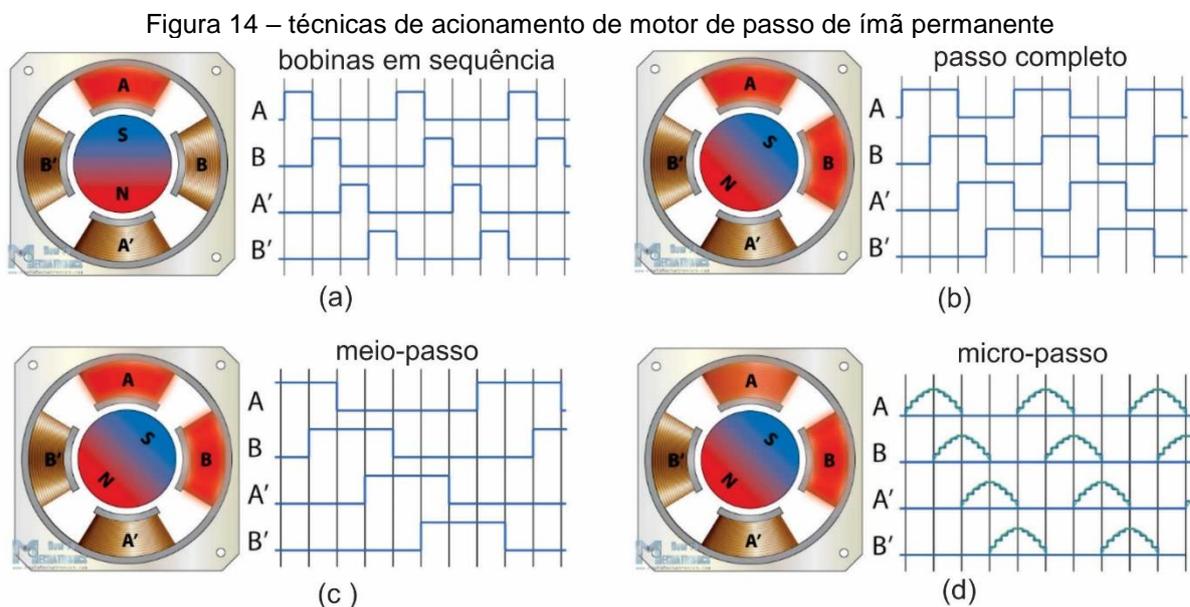
## 2.4 TECNOLOGIA DE ACIONAMENTO POR MOTOR DE PASSO

Os ADP's exigem, em alimentação de consumíveis em pó para processos de soldagem, controle apenas de velocidade, regulada e variada em função da taxa mássica desejada. Nesta aplicação, não há necessidade de controle de posição e, nem mesmo, inversão de sentido de rotação. Por estas razões, a maioria dos alimentadores empregam o acionamento por motor de passo. Tal tecnologia, amplamente difundida na área de automação, consiste em uma alternativa economicamente acessível, além de envolver recursos de controle e automação

relativamente simples. Basicamente, o acionamento é composto pelo motor e seu respectivo *driver*.

O motor de passo ostenta aspectos construtivos singulares, embora apresente variações que originam diferentes tipos. O tipo de motor de passo mais adotado pelos ADP's disponíveis comercialmente é o Híbrido Bipolar, classificação referente à suas características construtivas e número de bobinas do estator. Este modelo confere alto desempenho em controle de velocidade e posição, conservando altos níveis de torque. Também oferece flexibilidade para aplicação com diversas técnicas de acionamento.

A maioria dos motores de passo são construídos para oferecerem um passo de  $1,8^\circ$  ou seja, 200 passos para girar  $360^\circ$  ou uma rotação completa. Contudo, menores resoluções de passo podem ser obtidas dependendo do modo de acionamento. É possível, então, acionamento em meio passo ou micropasso. A Figura 14 associa a sincronização magnética entre rotor e bobinas de um motor de passo (de ímã permanente) com a técnica de acionamento correspondente.



Fonte: How to Mechatronics (2018).

O acionamento em meio passo consiste em energizar, alternadamente, uma e duas fases. Quando energizadas duas fases, o dente do rotor fica alinhado com o dente do estator. Quando duas bobinas são energizadas, o rotor se equilibra em uma posição intermediária às duas bobinas energizadas, correspondendo ao meio passo. O micropasso, por sua vez, é produzido energizando-se as bobinas em

intensidades diferentes, fazendo com que o rotor se equilibre em posições divergentes do alinhamento dos dentes ou do meio passo. Tal modo, além de diminuir até 100 vezes a resolução do acionamento, atenua a vibração causada pela energização repentina das bobinas.

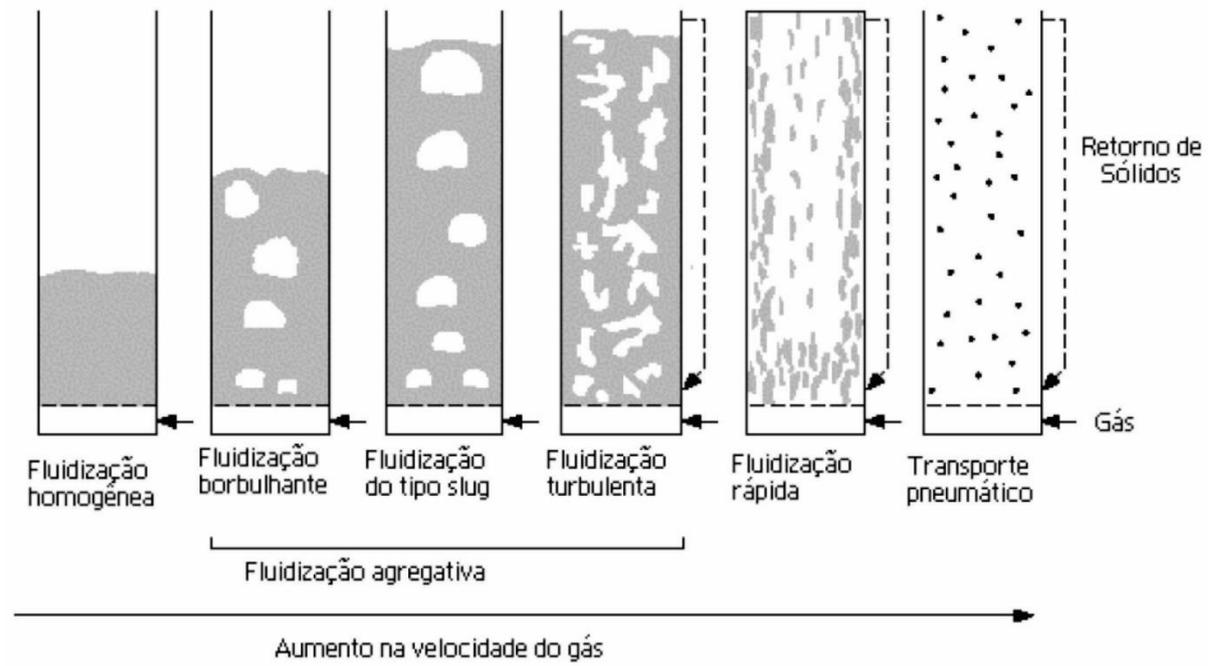
Outro recurso disponível em *drivers* comerciais é o modo *Smooth*, disponível na linha STR® da empresa Applied Motion Products. Consiste em uma técnica de acionamento baseada na energização e desenergização das bobinas por meio de rampas. Tal forma de acionamento das bobinas podem reduzir a vibração do motor de passo à níveis imperceptíveis ao tato humano.

## 2.5 TRANSPORTE PNEUMÁTICO

A transferência das partículas de pó, do ADP para a tocha de soldagem é feita via fluidização. A fluidização consiste em induzir uma porção de partículas sólidas a se comportarem como um líquido, podendo fluir ou sem mover entre si. Conseguem-se isto fazendo um fluido atingir as partículas, com velocidade suficiente para produzir força igual ou superior ao peso dos fragmentos[30].

O regime de fluidização com maior velocidade de gás é chamado transporte pneumático. Este é o regime empregado para o transporte de partículas de pó do ADP para a tocha de soldagem. Contudo, o regime de fluidização depende não só da velocidade do gás, mas também do diâmetro e densidade das partículas e da densidade do gás de fluidização [32]. Tipicamente, o sistema de alimentação emprega mangueiras de 4,0 mm de diâmetro interno e vazões de gás de fluidização entre 2,0 e 5,0 l/min. No processo PTA-P, o gás de fluidização é também chamado de gás de arraste. A Figura 15 traz uma representação do regime de transporte pneumático, associando-o a outros estados de fluidização, em função do aumento da velocidade do gás.

Figura 15 – Regimes de fluidização



Fonte: Lacerda et al, (2015).

### 3 PROJETO DO ADP DE ESTEIRA

Este capítulo aborda o projeto mecânico do ADP desenvolvido, associando aspectos construtivos com informações angariadas na pesquisa bibliográfica organizadas, por sua vez, na fundamentação teórica deste trabalho. Também, nesta sessão, serão tratados aspectos concernentes aos componentes de acionamento eletroeletrônico, além de recursos e técnicas de controle do dispositivo.

#### 3.1 REQUISITOS E ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO

A Tabela 1 relaciona os requisitos de projeto com suas respectivas especificações, organizando-os por nível de prioridade. Na sequência, os requisitos e especificações serão tratados em sessões distintas, onde cada item será devidamente comentado.

Tabela 1 – Requisitos e especificações do alimentador de pós alternativos

Prioridade	Requisito	Especificação
1	Alimentação contínua	Reservatório de Tremonha em Cunha
2	Alimentação constante	Mecanismo de Esteira Transportadora
3	Estanqueidade	<i>O'Rings</i> , juntas e adesivos
4	Resistência a desgaste	Formação livre de pilha de pó
5	Limpeza	Acesso facilitado a componentes sujos
6	Portabilidade	Peso até 5 kg, volume até 10 L
7	Visibilidade	Aberturas cobertas com acrílico

Fonte: Elaboração própria.

#### 3.2 REQUISITOS DE PROJETO

Em seguida, cada requisito de projeto do ADP desenvolvido é justificado. A sequência obedece ao nível de prioridade, em função das propriedades operacionais exigidas pelo dispositivo.

### **3.2.1 Ausência de interrupções permanentes**

O requisito primordial para projeto do ADP exige alimentação contínua de pós alternativos para os processos de soldagem. Neste sentido, busca-se evitar interrupções permanentes (defeitos de escoamento como arco ou caminho de rato) na injeção de consumíveis, fator que invalida operações de solda. A ocorrência deste fenômeno na manipulação de pós com o dispositivo proposto por este trabalho tornaria o desenvolvimento inútil, uma vez que os ADP's existentes já sofrem este problema operacional.

### **3.2.2 Ausência de variações instantâneas**

Outro aspecto operacional de extrema relevância para o dispositivo aqui proposto se trata das variações instantâneas no fluxo de pó. Oscilações, pulsações e variações aleatórias de curto período acabam por originar defeitos nas soldas, capazes de comprometer a aplicação de um processo de soldagem. Desta forma, espera-se que o ADP projetado apresente baixa susceptibilidade a variações instantâneas, oferecendo fluxo de pó constante durante todo o período de aplicação do revestimento.

### **3.2.3 Estanqueidade**

Vazamentos do gás de arraste devem ser evitados ao máximo no ADP desenvolvido. O vazamento de gás de arraste ocasiona o entupimento da linha de transporte pneumático e a contaminação da solda com ar atmosférico (oxidação da solda). O entupimento da linha de transporte pneumático, caracterizado pelo acúmulo de partículas de pó em regiões preferenciais da mangueira por conta de perda de carga, leva a interrupções permanentes de alimentação. Já a contaminação da solda ocorre em função dos pontos de vazamento realizarem, ao mesmo tempo, sucção do ar atmosférico. Tal fenômeno prejudica a proteção inerte do gás de proteção, aumentando os níveis de oxidação do revestimento, o qual pode chegar a comprometer o metal de solda [33].

### **3.2.4 Resistência ao desgaste**

Os principais tipos de desgaste que devem ser evitados no projeto do alimentador de pós alternativos tratam-se do desgaste abrasivo, erosivo e corrosivo. O desgaste abrasivo resulta do contato entre componentes em movimento relativo entre si e com as partículas de pó, ocorrendo no mecanismo de manipulação do sólido particulado. O desgaste erosivo, por sua vez, consiste em um fenômeno resultante da exposição de componentes mecânicos ao fluxo de partículas. Regiões de componentes expostas ao fluxo de partículas como funis e linhas de transporte pneumático estão sujeitas a este tipo de desgaste. O Desgaste corrosivo, enfim, ocorre principalmente pela oxidação de componentes. Espaços internos de reservatórios podem apresentar oxidação. Os fenômenos de desgaste supracitados podem ocasionar travamento do sistema mecânico, derivas nas características operacionais e contaminação do material manipulado.

### **3.2.5 Limpeza**

A possibilidade de realizar limpeza adequada do dispositivo também é um aspecto importante no projeto do ADP proposto neste trabalho. Os principais benefícios conferidos pela limpeza do dispositivo consistem na preservação de componentes mecânicos e prevenção de contaminação do material de adição. A remoção de partículas localizadas em regiões indesejadas do mecanismo evita o desgaste do sistema, conferindo durabilidade ao dispositivo. Este cuidado também evita a mistura de materiais consumíveis, assegurando que o pó empregado não receba partículas de outro material usado anteriormente.

### **3.2.6 Portabilidade**

O ADP é um componente do sistema de soldagem sujeito a constante manuseio. Normalmente ele se situa 1 ou 1,5 m acima do nível da tocha de soldagem, o que pode resultar em 2 ou 2,5 m em relação ao piso. Em função disto, é comum utilizar escadas ou cadeiras para desinstalá-lo ou reinstalá-lo, após execução de limpeza, manutenção ou retirada de pó restante de alguma operação. Desta forma, a

manuseabilidade deve ser garantida fornecendo ao ADP características portáteis, de acordo com os outros ADP's.

### **3.2.7 Visibilidade**

Em virtude de se tratar de um modelo que operará com materiais especiais, é essencial que este permita observação de algumas características de manipulação de pós. Para constatar eventuais problemas ou perfis não desejados de alimentação, é importante visualizar a região de formação da pilha de pó, o comportamento na queda do material e o funcionamento do sistema. Tal visibilidade pode ser alcançada incluindo paredes transparentes nas proximidades das regiões de interesse.

## **3.3 ESPECIFICAÇÕES**

Em seguida, cada especificação para desenvolver o projeto do ADP é justificada. A sequência obedece ao nível de prioridade, em função das propriedades operacionais exigidas pelo dispositivo.

### **3.3.1 Reservatório com Tremonha em Cunha**

Para obter alimentação ininterrupta a literatura aconselha adoção do regime escoamento em massa. A obtenção deste perfil é favorecida pela adoção de uma tremonha em cunha, com canal de descarga alongado. Em relação ao ângulo das paredes inclinadas da cunha, pode ser adotado o ângulo de  $30^\circ$  (em relação ao eixo de simetria vertical). Este parâmetro foi encontrado via medição do ângulo de empilhamento de uma mistura experimental, em ocasião de desenvolvimento de uma liga por PTA-P [10]. Já no que tange ao dimensionamento do canal de descarga, pode ser assumida a área de  $250 \text{ mm}^2$  como referência. Este valor foi usado em um trabalho que dimensionou o canal de descarga de uma tremonha cônica para escoamento de materiais alternativos no ADP de válvula rotativa [13]. A capacidade de estocagem será de  $500 \text{ cm}^3$ . Embora menor que dos outros ADP, este volume é suficiente para a maioria das atividades de pesquisa e inibe o usuário de deixar grandes quantidades de pó no ADP, sem as devidas condições de conservação.

### **3.3.2 Mecanismo Tipo Esteira Transportadora**

Em função da adoção do reservatório tipo cunha com canal alongado, será escolhido o mecanismo de manipulação tipo Esteira Transportadora. O mecanismo de fuso horizontal também é apropriado para operar com canais de descarga alongados, entretanto fornece alimentação do particulado com variações cíclicas. Embora o mecanismo de disco horizontal forneça alimentação em caráter constante, exigiria um canal de descarga alongado e curvado, cuja fabricação seria complexa. O dimensionamento pode adotar, como parâmetros de referência, o perímetro do tambor vertical (220 mm) e a largura do tambor (15 mm).

### **3.3.3 O'Rings, Juntas e Adesivos**

É essencial, tanto para a eficiência do transporte pneumático quanto para a qualidade do metal de solda, que o equipamento seja estanque a vazamentos de gás. Em virtude disto, deve-se empregar *O'Rings* de borracha, com dimensões adequadas a uniões circulares. Juntas também podem ser adotadas para vedar uniões de geometrias mais complexas. Materiais para fabricação de juntas como borracha, Velumoid e alumínio estão disponíveis no mercado. Há também à disposição no comércio adesivos, como silicone, que também podem ser usados, caso necessário.

### **3.3.4 Formação Livre da Pilha de Pó**

Uma das principais funções do processo PTA-P é revestir regiões de componentes mecânicos sujeitas a desgaste mecânico. Isto implica que a natureza de muitos dos materiais de adição pode sujeitar as peças do mecanismo de manipulação a altos níveis de abrasão. Sistemas de válvula rotativa e disco horizontal utilizam-se de peças de reposição que se desgastam ao restringir dimensionalmente o pó para manipulação com perfil desejado. O mecanismo de esteira transportadora, por sua vez, pode fornecer alimentação constante sem impor restrições dimensionais ao particulado. Este fato pode reduzir os níveis de desgaste, fazendo com que a esteira seja uma peça de substituição de baixa frequência ou mesmo uma peça permanente.

### **3.3.5 Acesso Facilitado a componentes Sujos**

O ADP a ser concebido deve favorecer o acesso interno do mecanismo de manipulação e do reservatório, afim de facilitar a limpeza do dispositivo. Para tanto, o projeto deve favorecer o desmonte e o acesso aos componentes internos do alimentador, além de aceitar limpeza com ar comprimido.

### **3.3.6 Peso e Volume**

A portabilidade necessária ao ADP pode ser baseada nos dados de massa e dimensões dos alimentadores disponíveis. A experiência em instalação e desinstalação destes equipamentos pode guiar este aspecto do projeto. A maioria dos dispositivos conhecidos apresentam peso não superior a 5 kg, com dimensões de aproximadamente 500 mm de altura e 100 mm de largura. O comprimento varia em função do mecanismo de manipulação adotado, contudo, não ultrapassa os 200 mm (como no caso do Fuso Horizontal). Em termos de volume, não deve ocupar espaço maior que 20 litros.

### **3.3.7 Aberturas Cobertas com Acrílico**

Por fim, características didáticas podem ser conferidas ao ADP, concedendo ao dispositivo regiões transparentes como escotilhas e janelas. Tais aberturas devem ser devidamente cobertas com acrílico, preparadas para receberem, também, elementos de vedação.

## **3.4 MODELO DE PROJETO**

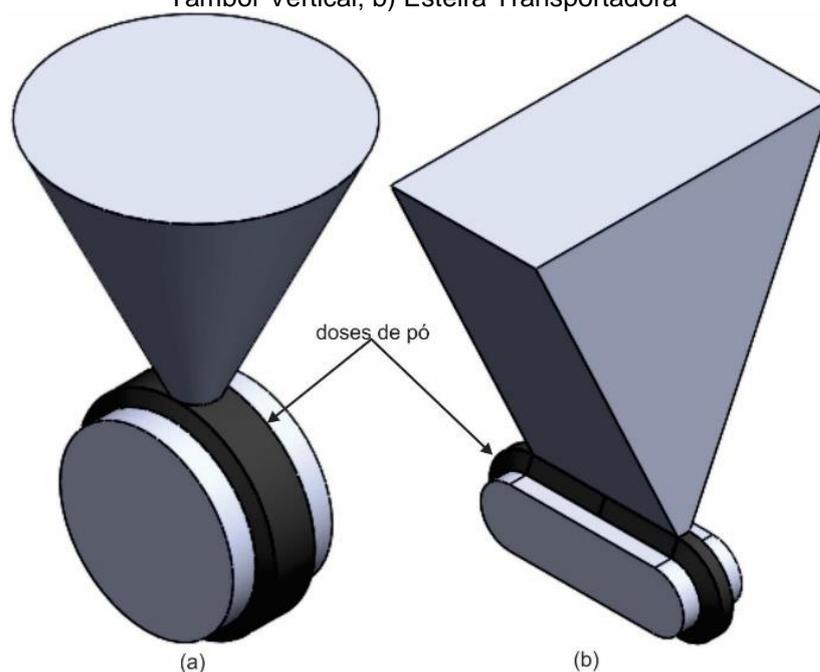
Entre todos os ADP's comentados na fundamentação teórica deste trabalho, o dispositivo que atende de maneira mais satisfatória, em termos gerais, é o ADP de Tambor [34]. Em operação com materiais de adição padronizados tal equipamento apresenta manipulação contínua de material com variações instantâneas mínimas. A taxa de alimentação depende quase que exclusivamente da velocidade de rotação do tambor. Outra vantagem provém do fato de este alimentador

não apresentar peças sujeitas a desgaste mecânico severo, dispensando o uso de peças de reposição. Estas características consistem nos principais motivos que levam este trabalho a adotar o equipamento como modelo para projeto.

Como visto, o tambor vertical não se mostra apropriado para operar com materiais alternativos sem aumentar o diâmetro do canal de descarga. Entretanto, o equilíbrio da pilha de pó exige que seja mantida a relação entre o diâmetro do canal de descarga (4 mm) e o diâmetro do tambor (70 mm). Por conta disto, o aumento de área do canal de descarga proposto (250 mm<sup>2</sup>) implica em aumentar muito o diâmetro do tambor, para cerca de 300 mm.

O principal empecilho desta dimensão para o tambor, além da perda da portabilidade do equipamento, é a redução da capacidade de operar com baixas taxas de alimentação. A pilha de pó apresentaria largura demasiada, ocasionando em grandes porções por rotação. Neste sentido, a esteira transportadora em conjunto com um canal de descarga alongado, podem fornecer uma área apropriada de escoamento para o canal de descarga e pilha de pó com pequena largura, unindo capacidade de escoamento com dosagem apropriada. A Figura 16 traz representações tridimensionais dos dois princípios com canais de descarga de áreas iguais. É possível notar que a liberdade de dimensionamento da largura do canal de descarga alongado pode fornecer dosagem menor e, com isso, maior controle em taxas menores.

Figura 16 – Princípios de funcionamento de alimentadores com mesma área de canal de descarga: a) Tambor Vertical; b) Esteira Transportadora



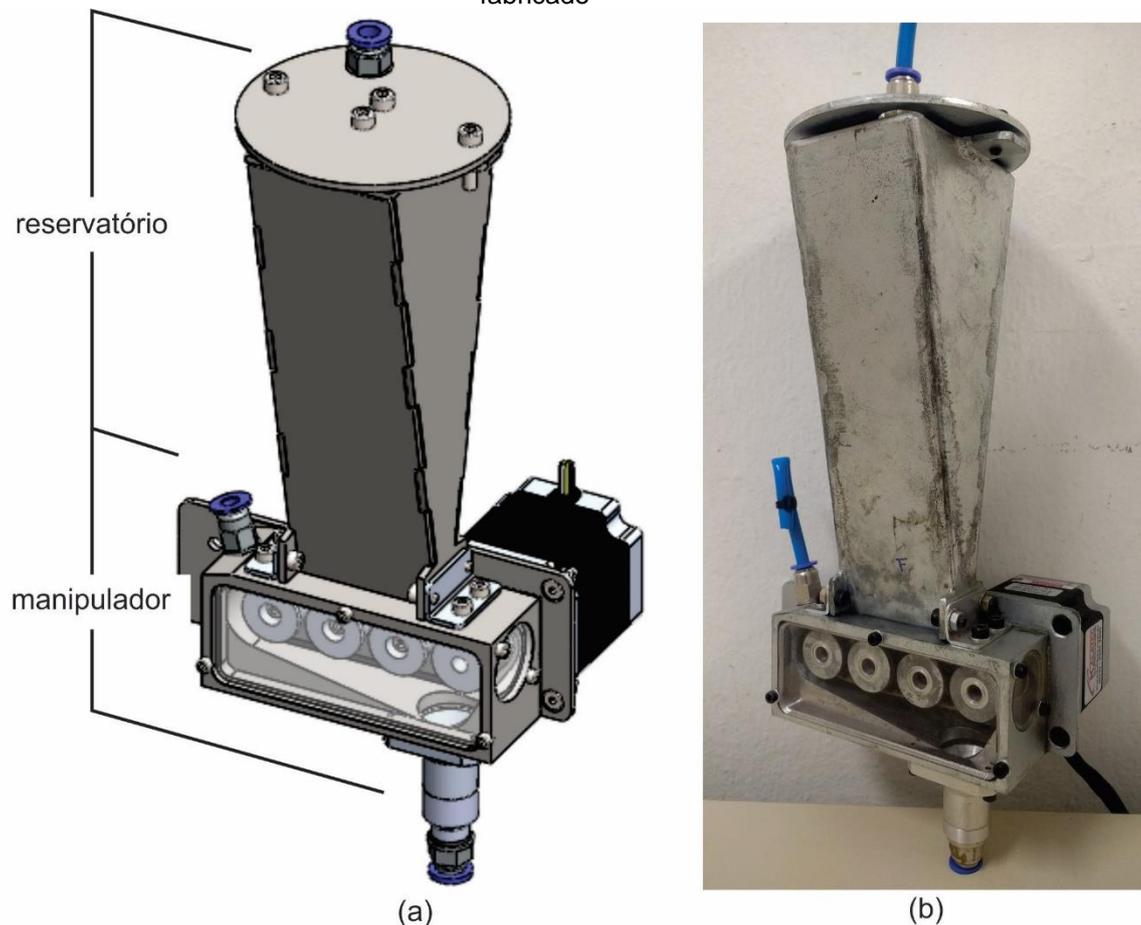
Fonte: Elaboração própria.

### 3.5 ASPECTOS GERAIS DO ADP DE ESTEIRA

Basicamente, o ADP de Esteira é constituído de duas partes principais, sendo estas o Reservatório e o Mecanismo Manipulador. A Figura 17 apresenta o dispositivo, fornecendo uma visão geral do projeto em ambiente CAD e do equipamento após fabricado. Como *software* de projeto foi empregado o Solidworks®. Quanto a processos de fabricação, a produção de peças do dispositivo envolveu corte LASER de chapas, torneamento, fresamento, soldagem e furação.

Na sequência, o trabalho aborda, em sessões distintas, o Reservatório e o Mecanismo Manipulador.

Figura 17 – Visão geral do ADP de Esteira: a) Dispositivo projetado em Solidworks; b) equipamento fabricado

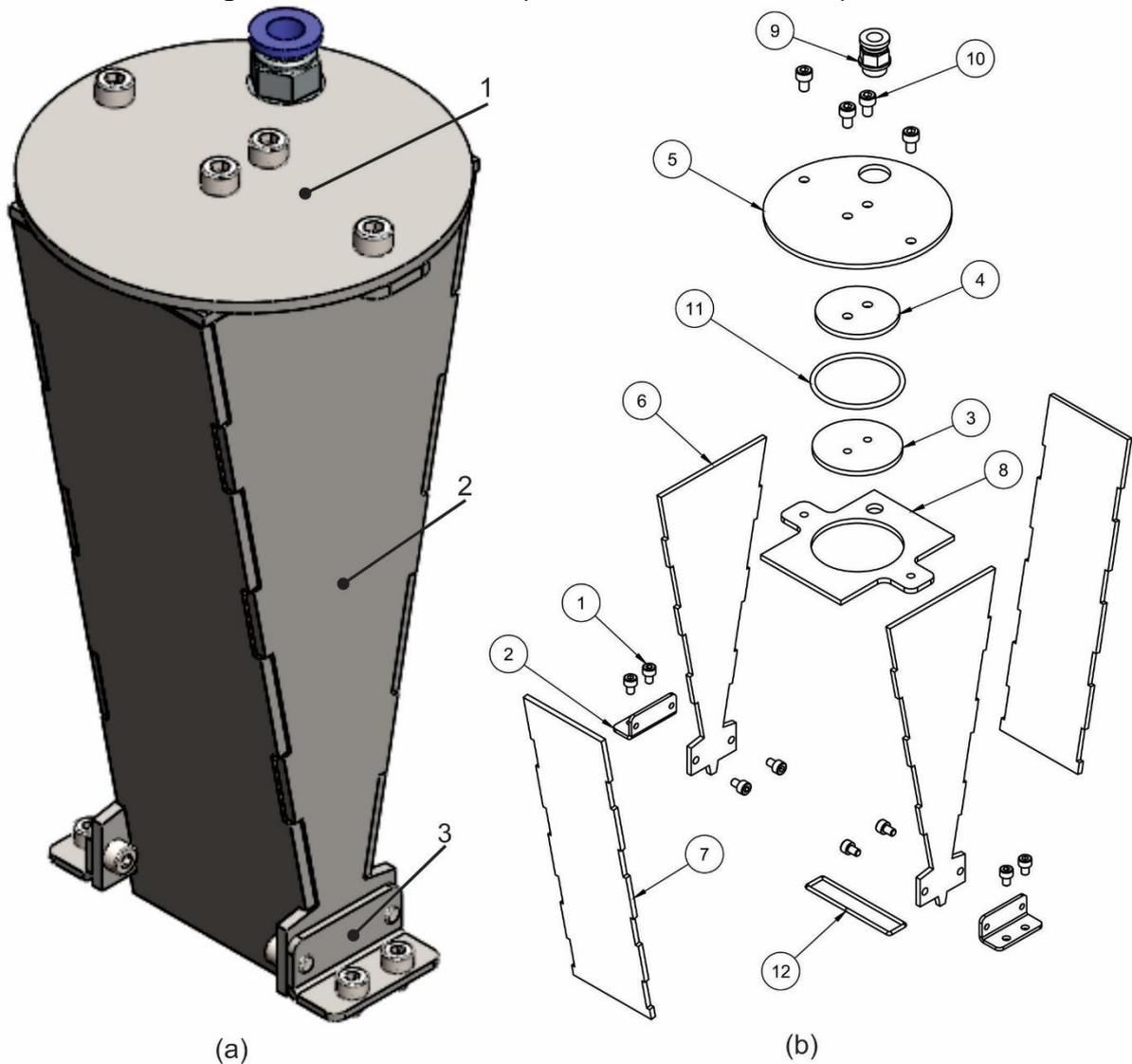


Fonte: Elaboração própria.

### 3.5.1 Reservatório

A Figura 18 ilustra o reservatório do ADP, apontando suas principais partes e aspectos dos principais detalhes. O item (a) desta figura apresenta uma vista em perspectiva do reservatório. O Número 1 aponta a Tampa, o número 2 indica a Tremonha e o número 3, por fim, mostra os componentes de fixação ao mecanismo manipulador de pó. Já o item (b) mostra uma vista explodida do reservatório completo. Esta imagem proporciona visualização de todos os seus componentes, associando-os a uma numeração que permite, por sua vez, identifica-los na Tabela 2.

Figura 18 – Reservatório de pó do ADP de Esteira Transportadora



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 2 – Lista de componentes do Reservatório

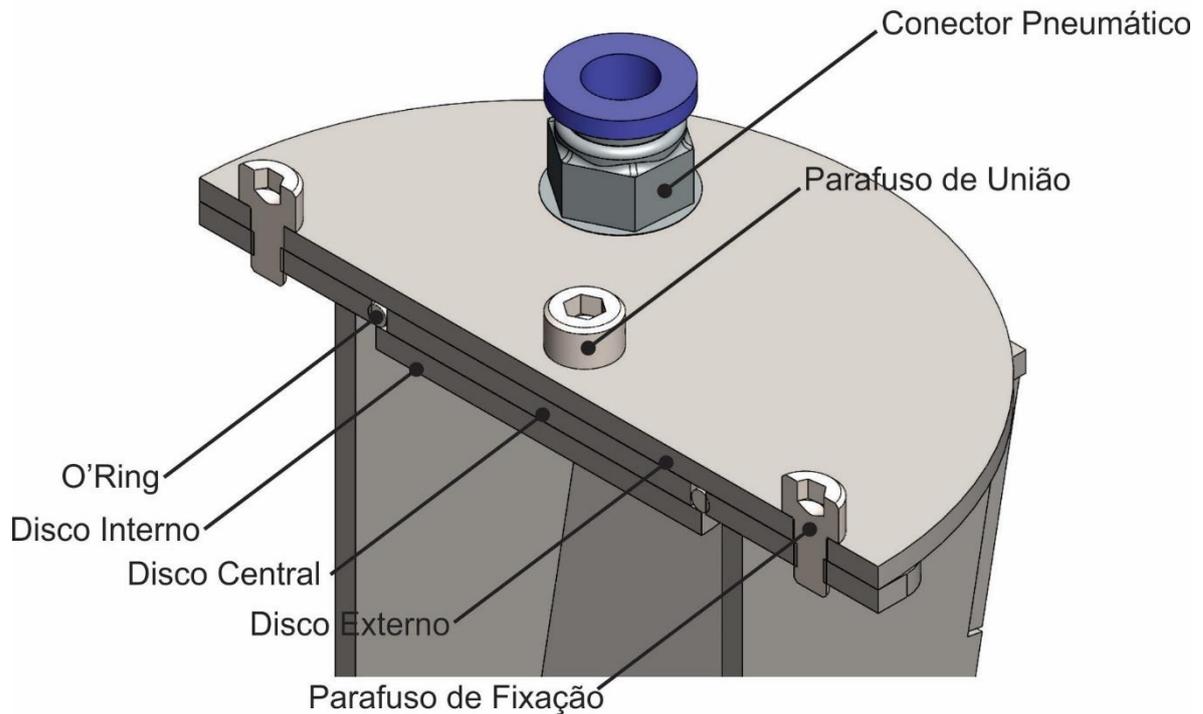
Número	Nome da Peça	Quantidade
1	Parafuso Allen Cilíndrico M4 x 6mm	8
2	Cantoneira de Fixação	2
3	Disco Interno	1
4	Disco Central	1
5	Disco Externo	1
6	Parede Paralela	2
7	Parede Inclinada	2
8	Cobertura	1
9	Conector Pneumático Rosca ½" 6 mm	1
10	Parafuso Allen Cilíndrico M5 x 8mm	4
11	O'Ring ISO (Ø=45mm; esp=2,65mm)	1
12	Junta de Silicone	1

Fonte: Elaboração própria.

### 3.5.1.1 Tampa

A Tampa do Reservatório é formada pelos itens 3, 4, 5, 9, 10 e 11 da Figura 18 (b). Consiste, basicamente, na união de três discos que formam um alojamento para o O'Ring (11) de vedação da Tampa. O Disco Inferior (3) é responsável pelo encosto interior do O'Ring. O Disco Central (4), com diâmetro menor, forma um rebaixo onde o O'Ring se encaixa. O Disco Externo (5), além de fornecer encosto para o O'Ring, serve como elemento de fixação da Tampa na cobertura da Tremonha. Este componente também apresenta um orifício roscado para instalação do Conector Pneumático (9), responsável pela canalização do gás de arraste para o interior do Reservatório. Tanto a união dos três discos que formam a Tampa, quanto a fixação desta na tremonha, são efetuadas por parafusos Allen de cabeça cilíndrica M5 (10), com comprimento de 8 mm. A Figura 19 apresenta, em corte, a Tampa do ADP de Esteira Transportadora. As tampas dos ADP disponíveis são rosqueadas. Contudo, por experiência de bancada, sabe-se que as roscas apresentam travamento e desgaste, em função de partículas de pó que se alojam entre os fios. Estes problemas podem originar vazamento de gás de arraste por falta de vedação nos fios de rosca desgastados, ou por falta de rosqueamento completo.

Figura 19 – Perspectiva em corte da Tampa do ADP de Esteira Transportadora



Fonte: Elaboração própria.

### 3.5.1.2 Tremonha

A Tremonha do Reservatório é formada pelos itens 6, 7 e 8 da Figura 18 (b). A Figura 20, por sua vez, apresenta a Tremonha montada, associando-a a suas principais características e seus aspectos de projeto, comentados a seguir.

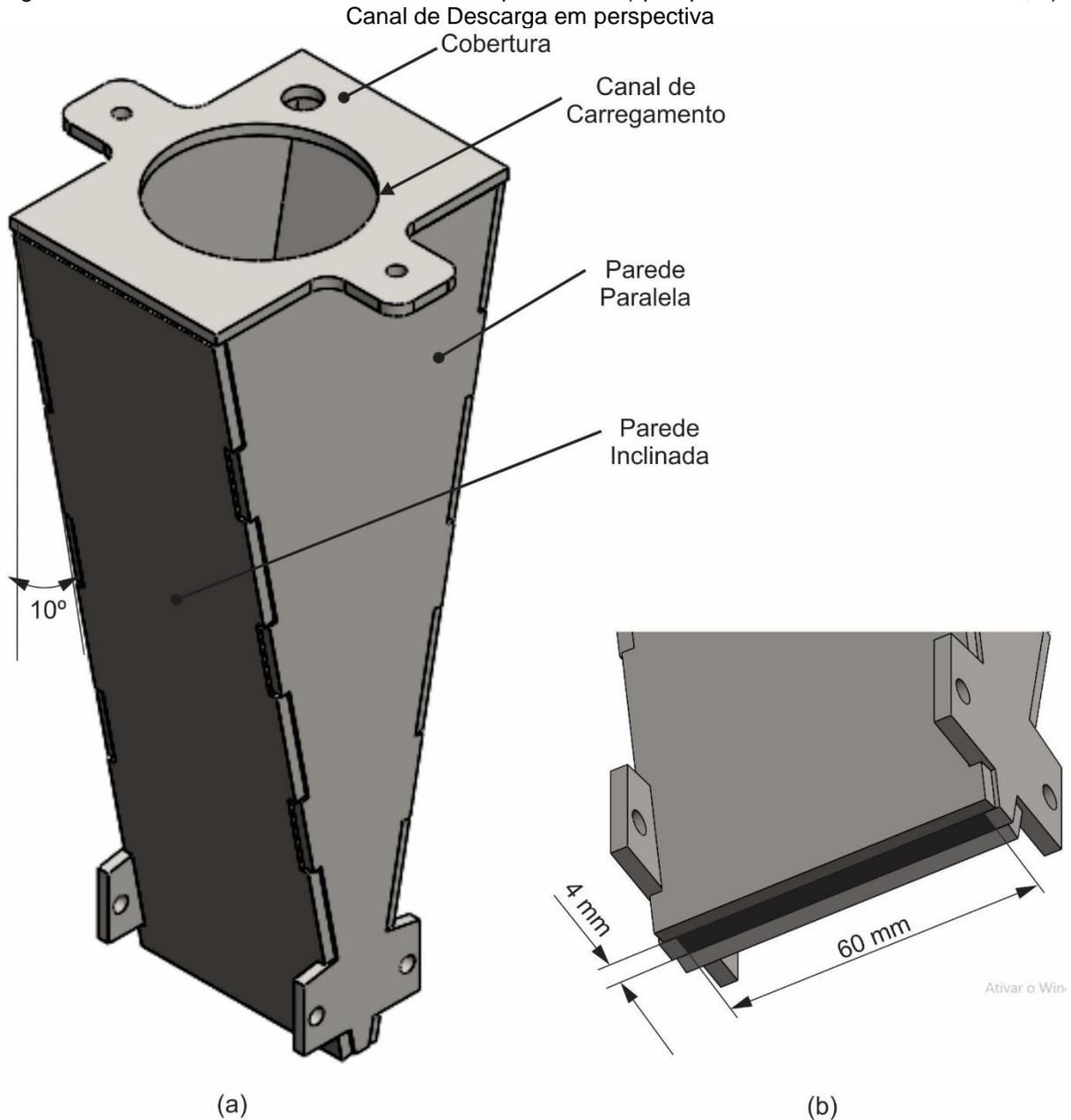
A Tremonha apresenta forma de cunha, com duas Paredes Paralelas e duas Paredes Inclinadas, com ângulo de  $10^\circ$  (em relação ao eixo vertical). Embora a literatura recomende uma angulação de  $30^\circ$  [10], o ângulo foi reduzido para conceder maior altura ao Reservatório. Desta forma, além de favorecer ainda mais o escoamento em fluxo de massa, a carga de material mantém seu peso de forma mais alinhada com o mecanismo manipulador, concedendo maior estabilidade ao protótipo.

O Canal de Descarga da Tremonha apresenta forma alongada (retangular). Sua largura foi adotada em função do diâmetro do canal de descarga do reservatório do ADP de Tambor Vertical, ou seja, 4 mm. Já o comprimento apresenta 60 mm, resultando em uma área de  $240 \text{ mm}^2$ , aproximada ao valor recomendado para escoamento em fluxo de massa [13].

O Canal de Carregamento é circular, centralizado na Cobertura da Tremonha. Este posicionamento induz a um carregamento centralizado, fator que, com menor intensidade, também favorece o escoamento em fluxo de massa.

As paredes foram projetadas com encaixes que serviram como gabarito, para garantir a angulação e a forma final, uma vez que a união das paredes e da cobertura foi realizada por soldagem.

Figura 20 – Tremonha do ADP de Esteira Transportadora: a) perspectiva isométrica da Tremonha; b)



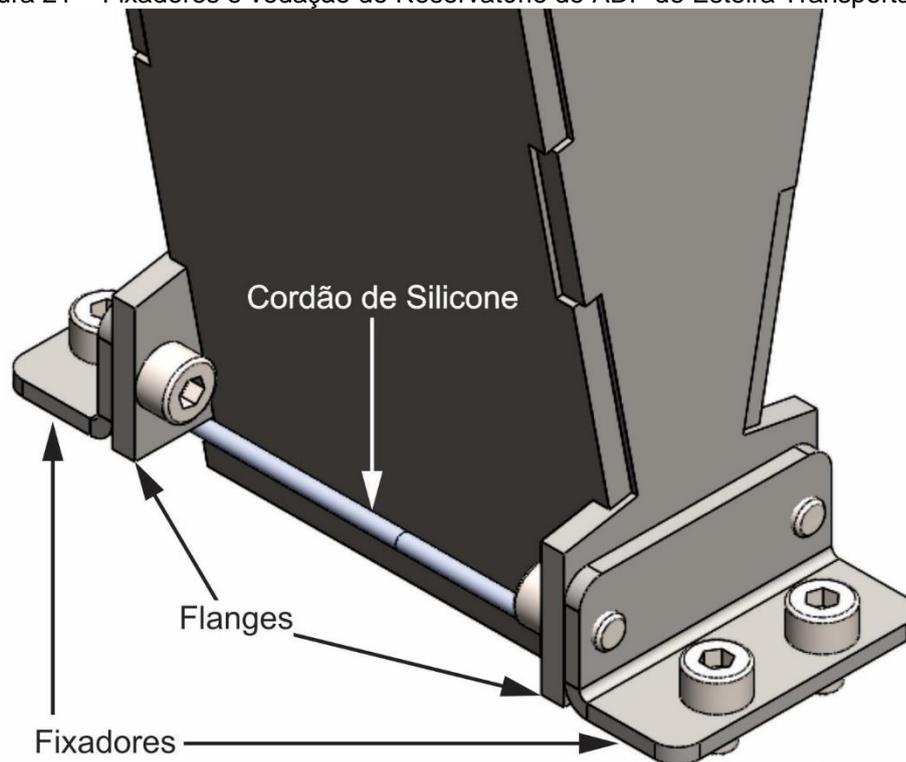
Fonte: Elaboração própria.

### 3.5.1.3 Fixadores

O Reservatório deve ser acoplado ao mecanismo manipulador. Para tanto, a Tremonha possui flanges que se encaixam com Fixadores. Estes, por sua vez, consistem em cantoneiras nas quais uma das abas conecta-se às Paredes Paralelas do Reservatório e outra acopla-se ao Mecanismo Manipulador. A fixação se dá por parafusos Allen de cabeça cilíndrica M4 x 6mm, como mostrado na Figura 21.

A junção entre o Reservatório e o Mecanismo Manipulador também deve ser vedada. Tal vedação, embora não se trate de uma peça usinada, é também representada na Figura 21. Trata-se de um cordão de silicone, aplicado na hora da montagem.

Figura 21 – Fixadores e vedação do Reservatório do ADP de Esteira Transportadora



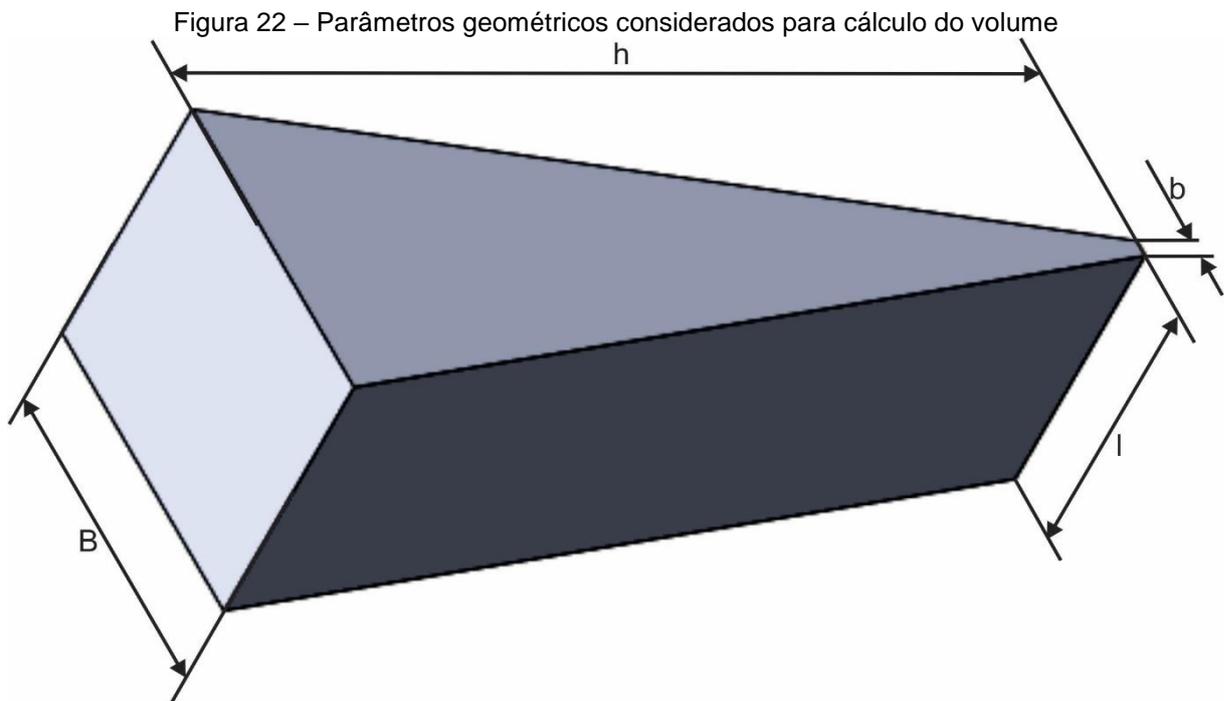
Fonte: Elaboração própria.

### 3.5.1.4 Capacidade Volumétrica do Reservatório

O volume interno do Reservatório foi projetado para comportar 500 cm<sup>3</sup> de material. Para ligas ferrosas, muito utilizadas no processo PTA-P, este volume equivale a aproximadamente 1 kg de pó. A capacidade é menor que dos reservatórios

dos ADP's conhecidos. Contudo, as atividades de pesquisa raramente requerem mais que isso. A equação 1 modela o volume da cunha (formato da tremonha), levando em consideração seus principais parâmetros geométricos, por sua vez, indicados na Figura 22.

$$V_R = \left[ \frac{(B + b) * h}{2} \right] * l \quad (1)$$



Fonte: Elaboração própria.

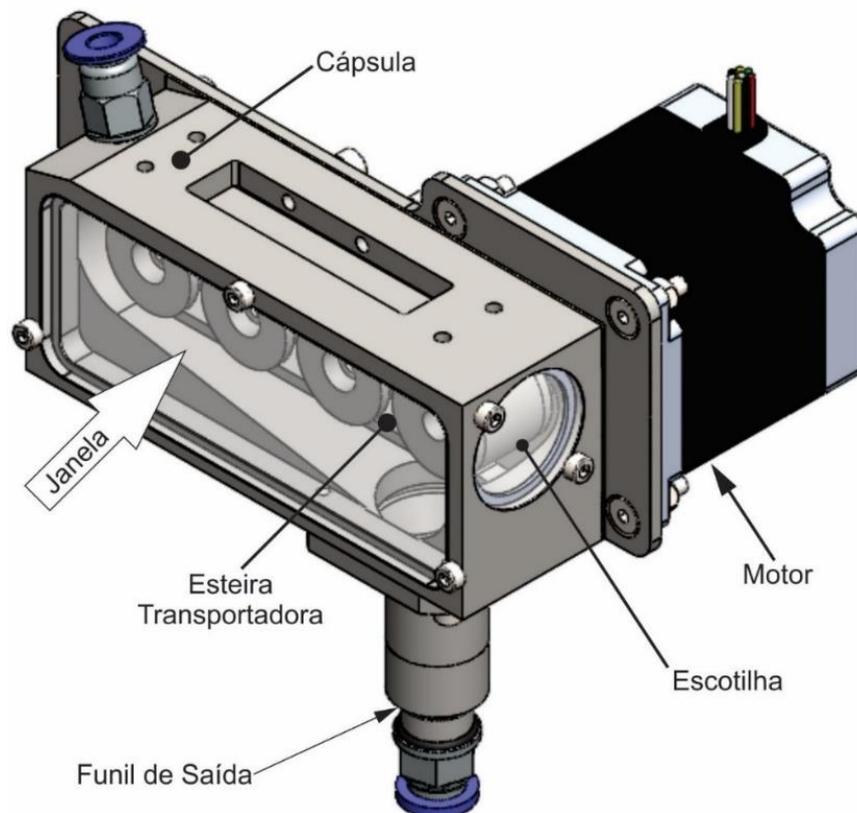
### 3.5.2 Mecanismo Manipulador

O mecanismo manipulador de pó desenvolvido para integrar o alimentador desenvolvido neste trabalho baseia-se no princípio das esteiras transportadoras. A Figura 23 ilustra o mecanismo em perspectiva isométrica, apontando seus principais componentes. A Figura 24, por outro lado, fornece uma vista explodida de todo o Mecanismo Manipulador, associando-os a uma numeração que permite identificá-los na Tabela 3. Basicamente, o Mecanismo Manipulador constitui-se de Motor, Esteira Transportadora, Cápsula e Funil de Saída. O Motor aciona a Esteira Transportadora que, por sua vez, funciona abrigada dentro de uma Cápsula. O pó escoado do reservatório forma uma pilha alongada sobre a região plana da esteira. Este acúmulo

é continuamente deslocado para a saída do mecanismo, ao mesmo tempo que se regenera sobre a esteira. O material é liberado pelo Funil de Saída, conectado à linha de transporte pneumático.

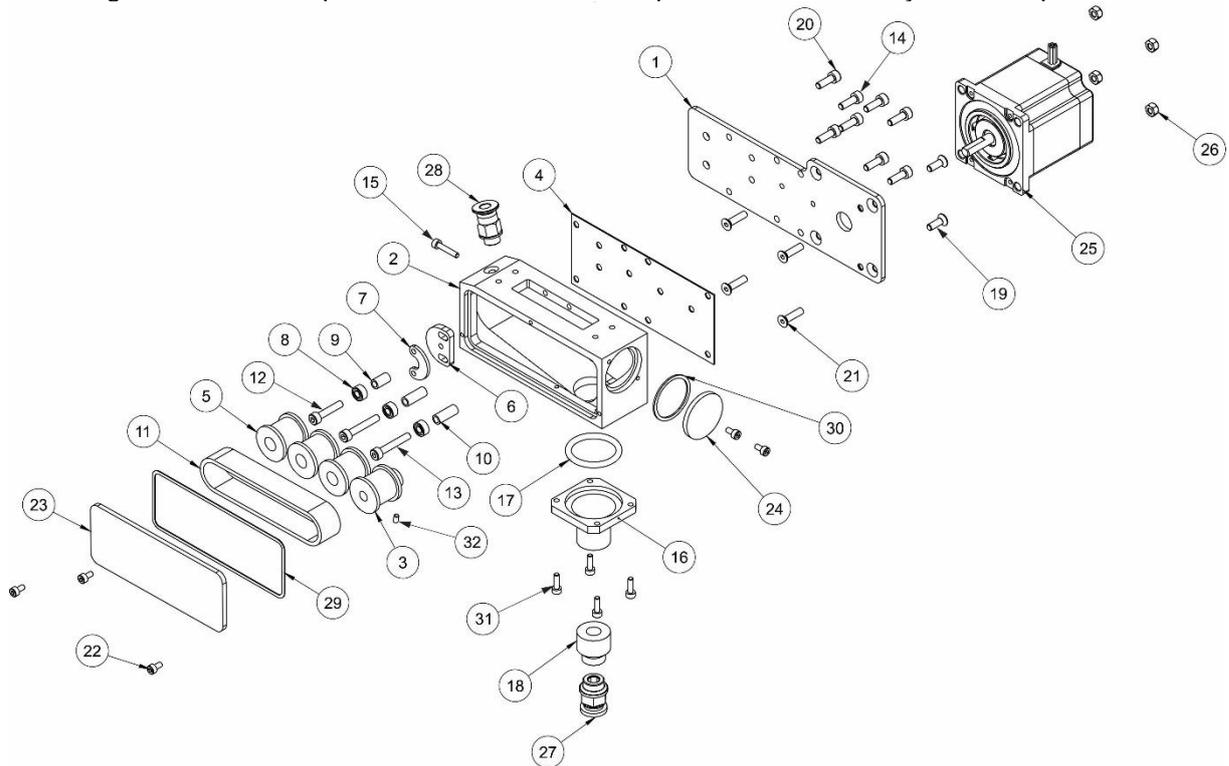
A Cápsula possui duas aberturas, sendo elas a Janela e a Escotilha. A Janela, na face frontal da Cápsula, dá acesso aos mecanismos internos. Este acesso, além de possibilitar a observação do comportamento da pilha de pó e do comportamento do mecanismo em funcionamento, favorece a limpeza interna e operações de montagem e desmontagem para manutenção. A Escotilha, abertura circular na face lateral, possui função de permitir a observação dos perfis de formação da pilha de pó e de como ocorre a queda para o Funil de Saída. Tanto a Janela quanto a Escotilha são cobertas por chapas de acrílico e vedadas com juntas. A fixação destas à Cápsula é realizada por pressão do encosto do parafuso (superfície inferior da cabeça cilíndrica) sobre a face da chapa.

Figura 23 – Mecanismo Manipulador em perspectiva com indicação dos principais componentes



Fonte: Elaboração própria.

Figura 24 – Vista explodida do Mecanismo Manipulador com numeração de componentes



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 3 – componentes do mecanismo manipulador

Número	Nome da Peça	Quantidade
1	Chapa de Fixação Motor-Cápsula	1
2	Cápsula	1
3	Polia Motora	1
4	Junta Chapa de Fixação Motor-Cápsula	1
5	Polia Movid	3
6	Esticador D	1
7	Esticador C	1
8	Rolamento ISO 684	3
9	Espaçador Pequeno	1
10	Espaçador Grande	2
11	Esteira Transportadora	1
12	Parafuso Allen Cilíndrico M4 x 20mm	1
13	Parafuso Allen Cilíndrico M4 x 25mm	2
14	Parafuso Allen Cilíndrico M4 x 12mm	2
15	Parafuso Allen Cilíndrico M3 x 16mm	1

Número	Nome da Peça	Quantidade
16	Funil de Saída	1
17	O'Ring ISO ( $\varnothing=26,5\text{mm}$ ; esp= $3,55\text{mm}$ )	1
18	Adaptador de Conector Pneumático	1
19	Parafuso Allen Chato M4 x 10mm	2
20	Parafuso Allen Cilíndrico M4 x 12mm	6
21	Parafuso Allen Chato M4 x 16mm	4
22	Parafuso Allen Cilíndrico M3 x 6mm	5
23	Janela	1
24	Escotilha	1
25	Motor de Passo NEMA 23 KTC-HT23-397	1
26	Porca Auto-travante M4	4
27	Conector Pneumático Rosca $\frac{1}{2}$ " 8 mm	1
28	Conector Pneumático Rosca $\frac{1}{2}$ " 6 mm	1
29	Junta Janela	1
30	Junta Escotilha	1
31	Parafuso Allen Cilíndrico M3 x 10mm	4
32	Parafuso Allen Prisioneiro M3 x 10mm	1

Fonte: Elaboração própria.

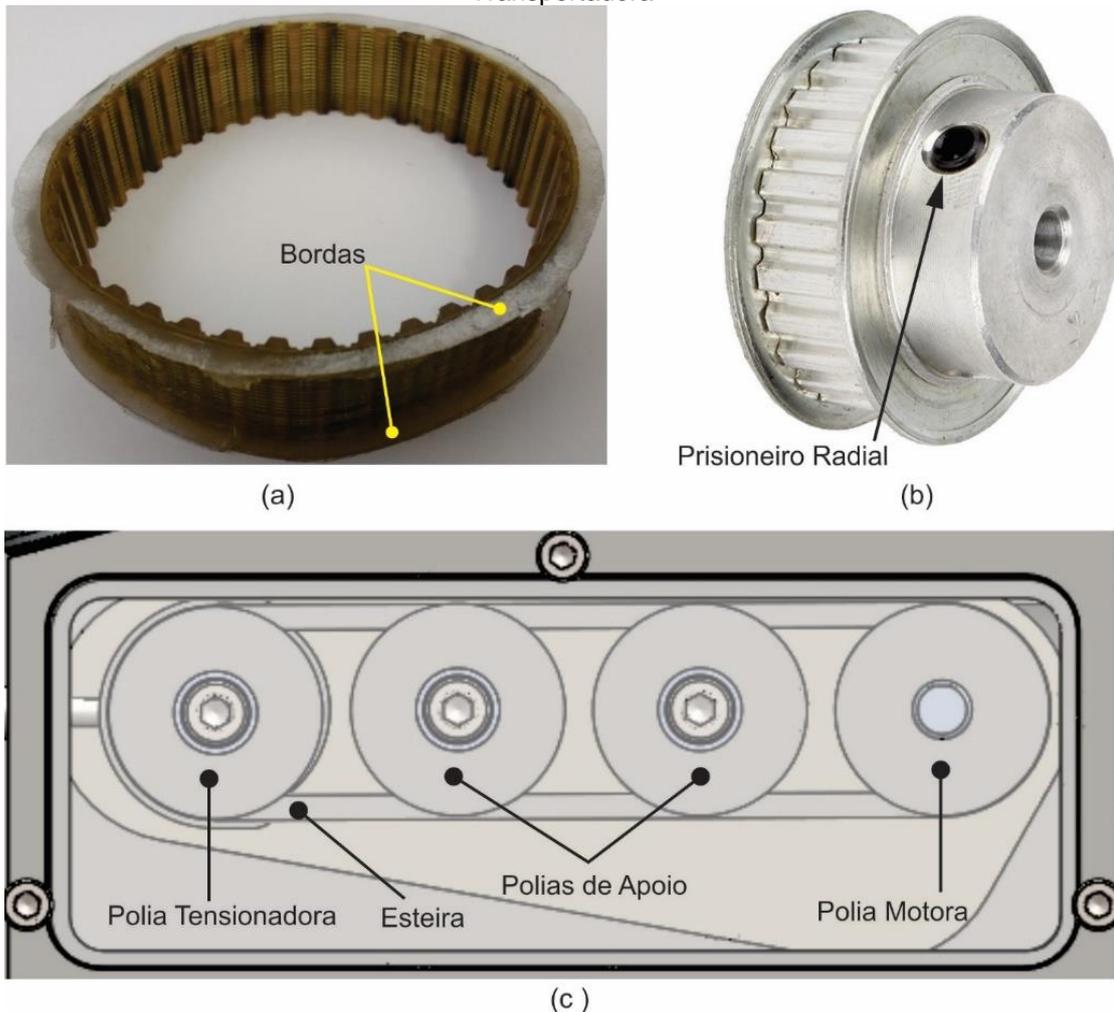
### 3.5.2.1 Mecanismo da Esteira Transportadora

A Figura 25 apresenta os principais aspectos do sistema de transmissão que compõe a Esteira Transportadora. A esteira escolhida é conhecida como correia sincronizadora, tipicamente empregada em sistemas de transmissão mecânica. Sua superfície interna apresenta dentes com passo definido, de modo a proporcionar engrenamento. Para aplicação no ADP foram implementadas bordas flexíveis de silicone, com função de evitar a queda de partículas pelas laterais da esteira, o que prejudicaria o desempenho do alimentador. A Figura 25 (a) mostra a esteira com as bordas flexíveis. As polias utilizadas também são do tipo sincronizadoras. O engrenamento promovido evita o escorregamento da correia mantendo, assim, o seu deslocamento sempre proporcional a velocidade do motor. No mecanismo, há uma polia motora enquanto as outras são movidas. A polia motora é fixada ao eixo do Motor

via prisioneiro radial, como mostrado na Figura 25 (b), obedecendo unicamente à rotação deste. Já as polias movidas apresentam rolamento livre. A polia movida da extremidade, chamada Polia Tensionadora, está conectada a um mecanismo esticador, assumindo incumbência de manter a correia tensionada. O referido mecanismo será abordado na próxima sessão.

As duas polias centrais, por sua vez, foram inseridas com função de apoio. Elas evitam a flexão da correia em função do peso do pó, fenômeno que pode afetar significativamente a dosagem do Mecanismo Manipulador. Tal problema poderia tornar inviável a calibração do alimentador, uma vez que a dosagem não dependeria somente da rotação controlada da esteira, mas também de um fenômeno aleatório de forte influência. A localização de cada polia no Mecanismo de Manipulação pode ser conferida na Figura 25 (c).

Figura 25 – Sistema de transmissão da Esteira Transportadora: a) esteira com bordas flexíveis; b) fixação da polia motora por parafuso radial; c) vista frontal do sistema de transmissão da Esteira Transportadora

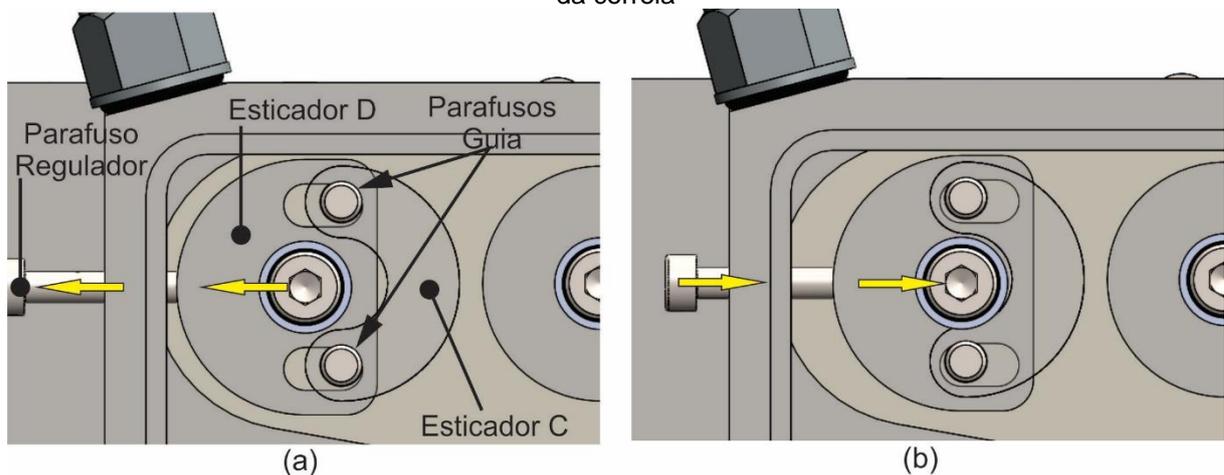


Fonte: Elaboração própria.

### 3.5.2.2 Mecanismo Esticador

O Mecanismo Esticador, apresentado na Figura 26, que sustenta a polia movida da extremidade, é composto por três peças. A principal é o Esticador D. Este componente apresenta rasgos oblongos que deslizam sobre parafusos guias, presos à Capsula do Mecanismo Manipulador. O movimento desta peça (ilustrado com setas na Figura 26) é efetuado pelo rosqueamento do Parafuso Regulador, acessível na lateral da Cápsula. Contudo, esta movimentação só é liberada pelo afrouxamento dos dois parafusos guia acessados, por sua vez, pela parte traseira da Cápsula. Tal ação desencosta o Esticador C e desprende o conjunto para fornecer regulagem.

Figura 26 – Mecanismo esticador: a) movimento de aperto da correia; b) movimento de afrouxamento da correia

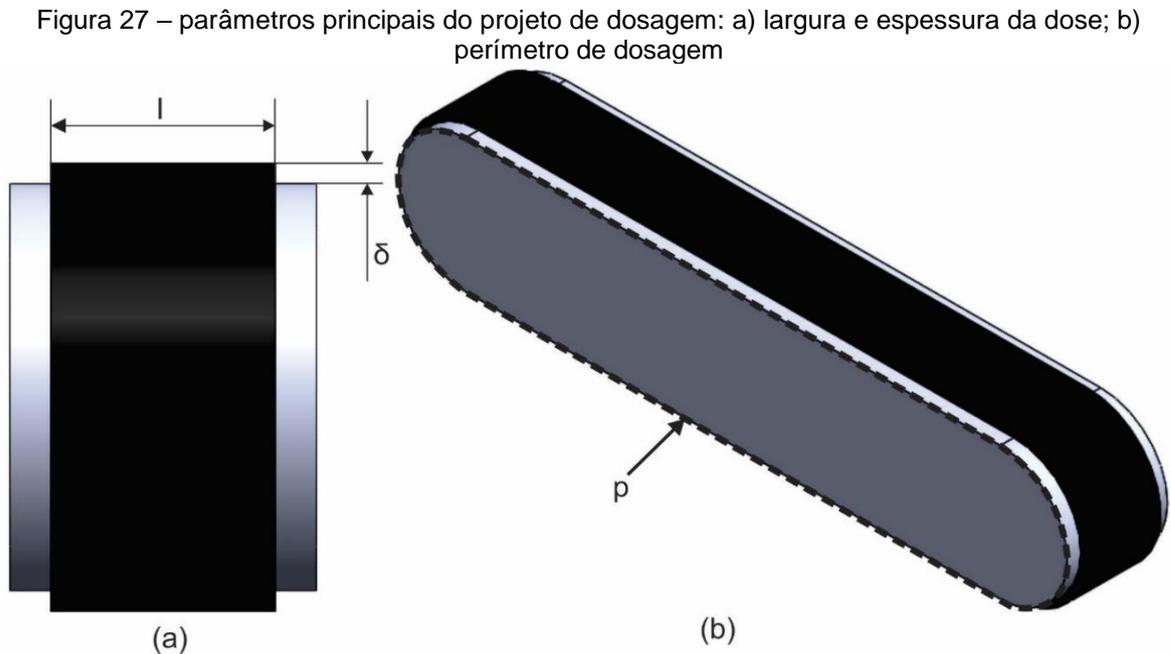


Fonte: Elaboração própria.

### 3.5.3 Projeto de Dosagem

Embora o ADP de Esteira Transportadora não restrinja dimensionalmente a pilha de pó, deve ser considerada uma tendência volumétrica de dosagem que, por sua vez, corresponde a uma taxa mássica, dependente da densidade aparente do sólido particulado. Para estimar a dosagem volumétrica, deve-se assumir uma geometria para a pilha de pó, apresentada na Figura 27. Neste caso será aceito, como representado na Figura 27 (a), que a pilha de pó apresenta uma seção transversal retangular com altura ( $\delta$ ) de 1 mm (correspondendo ao espaço entre o canal de descarga e a superfície superior da Esteira Transportadora) e largura ( $l$ ) 11 mm (que corresponde a largura da esteira subtraindo-se a espessura das bordas). O volume

de dosagem ( $V_d$ ), então, será a área deste retângulo multiplicada pelo perímetro ( $p$ ) da esteira. O perímetro, vale 220 mm e está representado pelo contorno tracejado na Figura 27 (b).



Fonte: Elaboração própria.

O volume é modelado pela equação 2, em que, aplicando os valores mencionados, obtém-se o volume de dosagem estimado.

$$V_d = \delta * l * p \quad (2)$$

$$V_d = 1 * 11 * 220$$

$$V_d = 2420 \text{ mm}^3$$

$$V_d = 2,42 \text{ cm}^3$$

Estima-se, então, dosagem volumétrica teórica de 2,42 cm<sup>3</sup> de material por revolução completa da esteira. A partir disto, tomando o valor de densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ) de um pó padrão PTA-P Inox 316L (50 a 150)  $\mu\text{m}$  como sendo 4,05 g/cm<sup>3</sup> [13], pode-se estimar dosagem mássica por volta da esteira pela equação 3.

$$m_d = \rho_{ap} * V_d \quad (3)$$

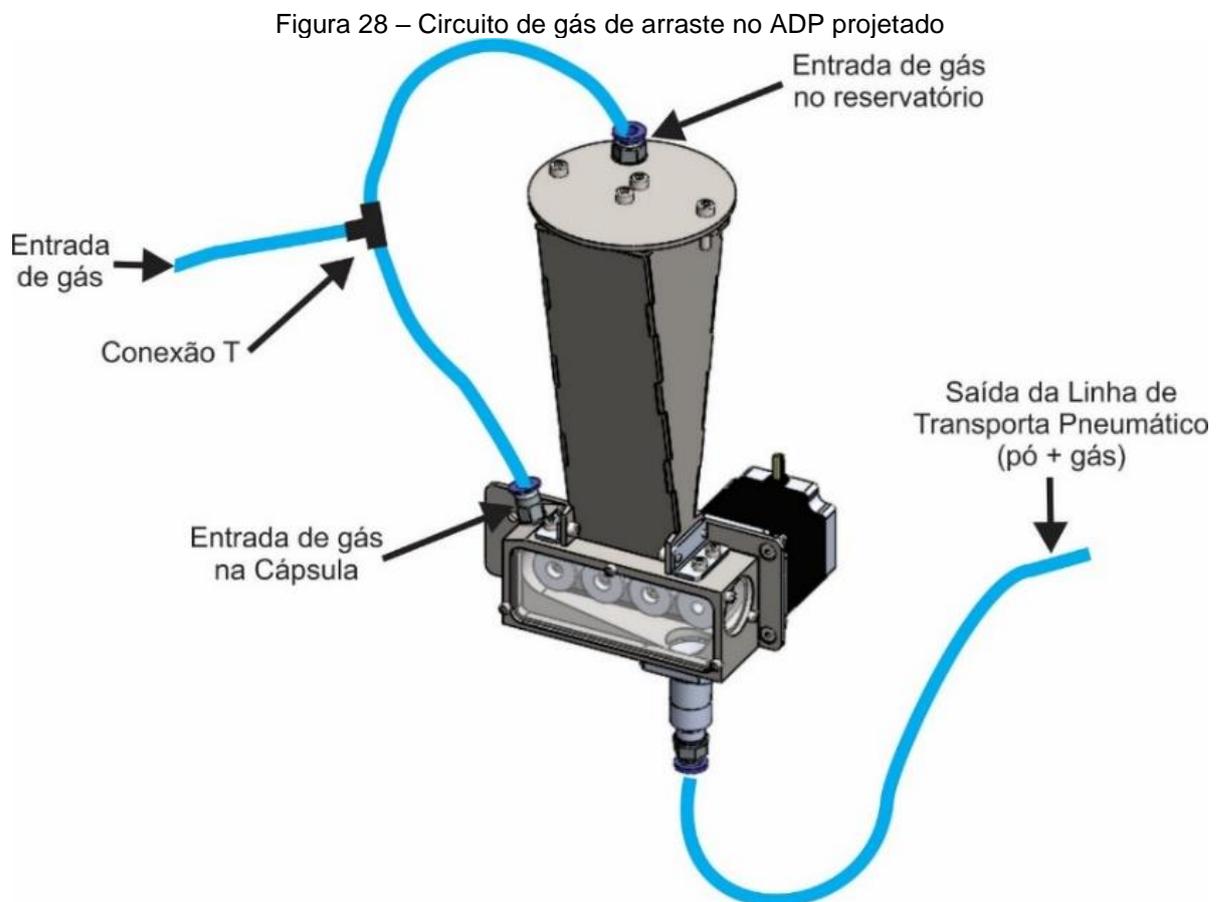
$$m_d = 4,05 * 2,42$$

$$m_d = 13,36 \text{ g}$$

Este valor, embora varie de material para material, serve como noção de dosagem mássica para pós a base de ferro, amplamente utilizados no processo PTA-P.

### 3.5.4 Circuito de Gás de Arraste

O circuito de gás de arraste do ADP de Esteira está representado na Figura 28.



Fonte: Elaboração própria.

A entrada de gás, proveniente da fonte de soldagem (como será detalhado mais adiante), é bifurcada por uma conexão tipo T. Um ramo é conectado a uma entrada de gás disponível no reservatório, enquanto o outro é acoplado à Cápsula. A inserção de gás nos dois componentes busca a equalização da pressão interna em todo ADP. Tal equilíbrio busca estabilidade da formação da pilha de pó e do fluxo de partículas em Transporte Pneumático. O expurgo do ar atmosférico por todo espaço

interno do dispositivo (inclusive entre as partículas do pó estocado) também é realizado com mais eficiência, evitando oxidação demasiada das soldas na fase inicial do processo. A mangueira de transporte pneumático é conectada ao funil de saída (no Mecanismo Manipulador). Por ela a mistura pó + gás é direcionada à tocha PTA-P.

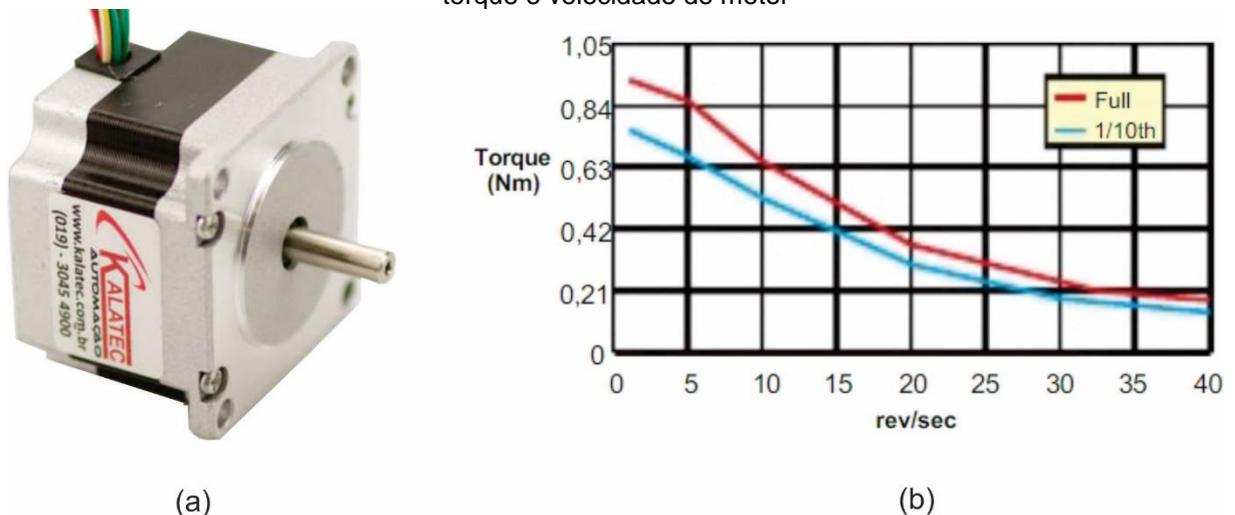
### 3.6 ACIONAMENTO E CONTROLE DO ADP

Para o completo desenvolvimento do dispositivo, foi necessário selecionar os componentes do acionamento de acordo com os recursos de controle disponíveis. Portanto, o trabalho seguirá com a descrição dos componentes, além de abordar os detalhes pertinentes à integração do ADP projetado com o restante do sistema de alimentação.

#### 3.6.1 Motor do ADP

O Motor de Passo selecionado para integrar o protótipo é o modelo NEMA 23 KTC-HT23-397 [35]. A Figura 29 expõe sua aparência e suas propriedades relativas a torque e velocidade. Já a Tabela 4 relaciona as principais características do referido modelo. A adoção do motor de passo NEMA 23 KTC-HT23-397 para o acionamento do protótipo foi influenciada pelos recursos de acionamento e controle disponíveis na fonte de soldagem, a qual será comentada na próxima sessão.

Figura 29 – Motor de Passo NEMA 23 KTC-HT23-397: a) imagem do motor; b) curva de relação entre torque e velocidade do motor



Fonte: a) Kalatec (2018); b) Kalatec (2018).

Tabela 4 – Principais características do Motor de Passo NEMA 23 KTC-HT23-397

<b>Característica</b>	<b>valor</b>	<b>unidade</b>
Altura (Flange)	56,0	mm
Largura (Flange)	56,0	mm
Comprimento	50,8	mm
Peso	690	g
Diâmetro do Eixo	6,35 (1/4)	Mm (pol.)
Ângulo de Passo	1,8	°
Corrente Bipolar Paralelo	2,8	A/Fase
Inércia	300	g.cm <sup>2</sup>
Torque Estático Bipolar	1,25	N.m
Temperatura Operação	-20 a +50	°C
Quantidade de Fios	8	-

Fonte: Kalatec (2018).

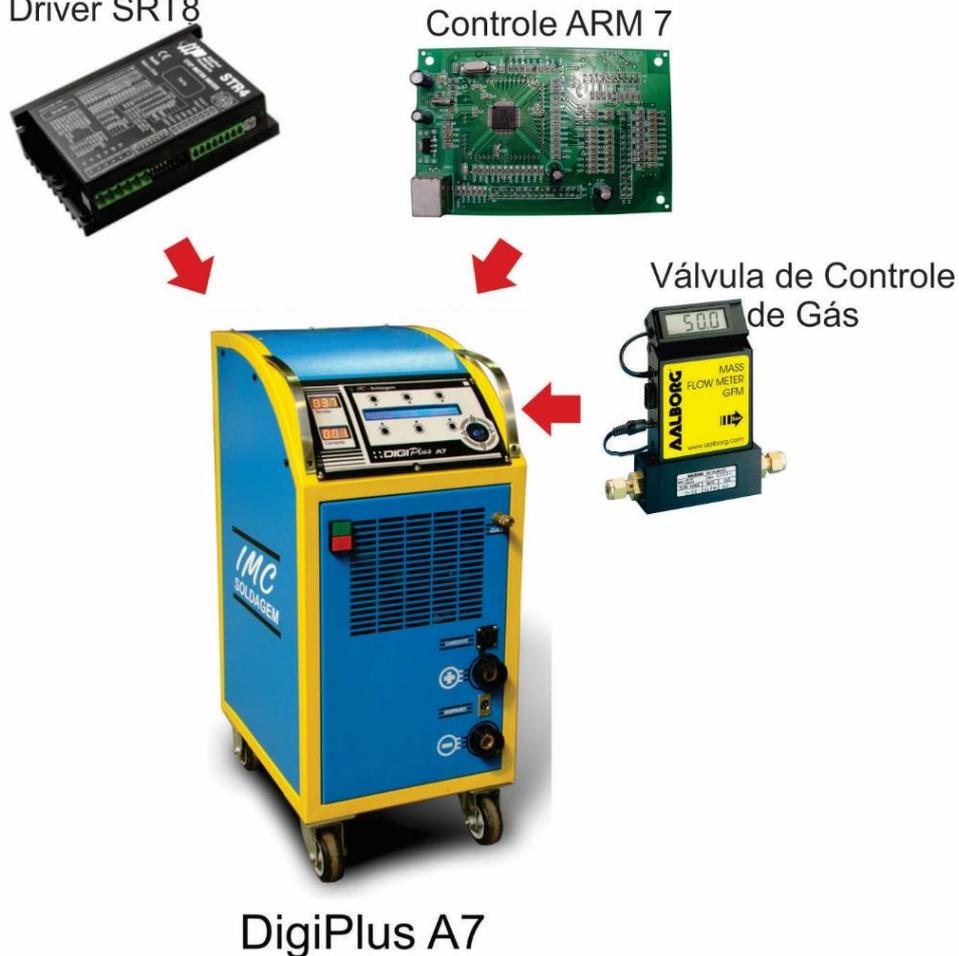
### 3.6.2 Fonte de Soldagem

A fonte que compõe a bancada PTA-P do LABSOLDA consiste no modelo DigiPlus A7®, do fabricante IMC Soldagem. Tal equipamento oferece recursos para aplicação em diversos processos de soldagem a arco, entre eles, o PTA-P [36]. Para tanto, estão integrados à fonte a maioria dos periféricos necessários a este processo de soldagem.

A DigiPlus A7 é microcontrolada, equipada com uma placa de controle baseada na Tecnologia dos microcontroladores ARM 7. Dispõe também de uma interface munida de *display* de LCD e botões que permitem navegar no *software*, selecionando funções, mostrando valores de saída e possibilitando entrada de valores em variáveis. Tais recursos permitem a entrada de dados de rotação do motor e vazão de gás de arraste. Além dos valores de regime, há possibilidade de configuração de rampas de iniciação e finalização das vazões de pó e gás. Para tanto, a placa ARM 7 controla um *driver* de motor de passo e uma válvula de controle de vazão de gás, também integradas à fonte. A Figura 30 ilustra uma noção global da fonte de soldagem DigiPlus A7 e seus principais periféricos envolvidos na alimentação de pó no processo de soldagem PTA-P.

A válvula de controle de vazão de gás de arraste que compõe a DigiPlus A7 é o modelo GFC®, da empresa Aalborg. Apresenta faixa de medição entre 0 e 5 l/min, com resolução de 0,1 l/min e disponibiliza interface de comunicação serial padrão RS 232, que permite disparo, finalização e controle da vazão de gás de arraste por meio do microcontrolador da fonte.

Figura 30 – Fonte DigiPlus A7 com periféricos essenciais à alimentação de pó no processo PTA-P

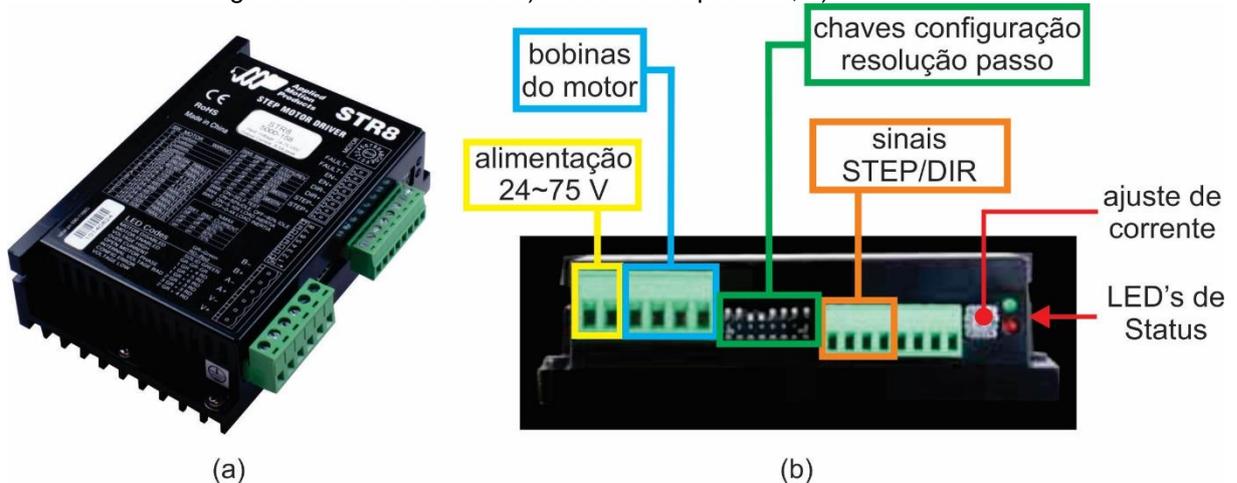


Fonte: Alves (2011), adaptado.

### 3.6.3 Driver de Acionamento

O *driver* integrado à DigiPlus A7, responsável pelo acionamento do Motor de Passo, é o modelo STR8 da Empresa Applied Motion Products. Além de ser considerado como uma das alternativas comerciais mais indicadas para acionamento do motor selecionado, como consta no seu *datasheet* [35], já foi empregado em um protótipo de alimentador de pó [13]. Seu aspecto e funcionalidades são mostrados pela Figura 31.

Figura 31 – *Driver STR8*: a) módulo encapsulado; b) funcionalidades



(a)

(b)

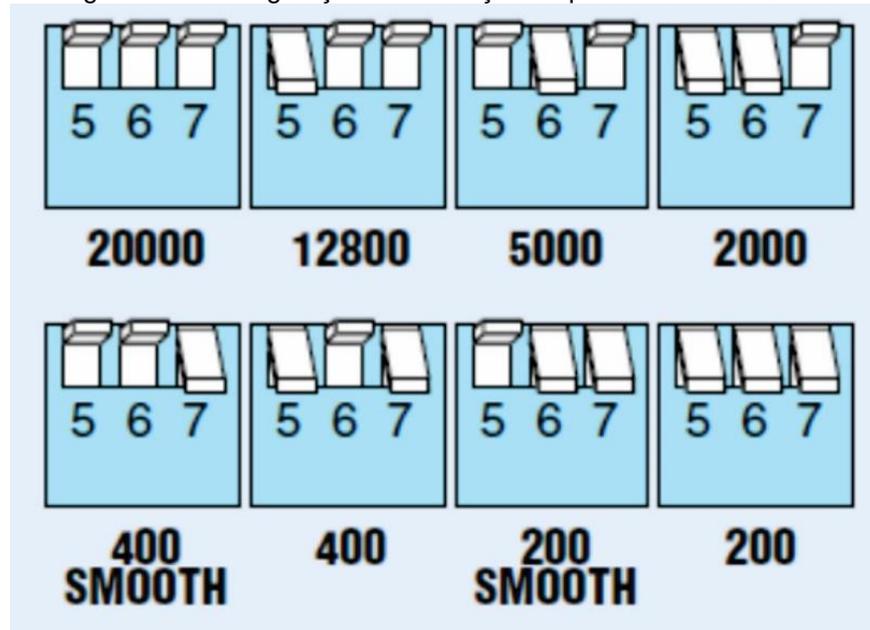
Fonte: a) Applied Motion Products (2018); b) Alves (2011).

Este *driver* aceita alimentação com faixa de tensão entre 24 a 75 V. Apresenta também LED's de Status em que o verde indica funcionamento pleno e o vermelho, por sua vez, prenuncia erro. Um cursor de potenciômetro mostra-se também acessível, o qual viabiliza ajuste de corrente. Conexões para as bobinas do motor e sinais de controle de passo e direção ficam também expostas na lateral do módulo.

Além de todas as funcionalidades relatadas, o próprio *driver* disponibiliza opções de *setup* via painel composto por oito chaves [37]. As duas primeiras chaves fornecem opções de redução da corrente regulada no potenciômetro, permitindo redução de aquecimento. A terceira chave serve para otimizar o desempenho do motor em função da sua inércia, evitando vibrações excessivas, alto consumo de corrente e ressonâncias inesperadas. A chave número quatro, por sua vez oferece um recurso de redução de corrente (em até 90%) para quando o motor estiver parado. Caso a aplicação não exija altos torques enquanto o mecanismo estiver estático, esta opção reduz consumo e aquecimento. Por fim, as chaves 5, 6 e 7, em conjunto, fornecem diferentes resoluções de passo sendo que, as mais baixas, podem oferecer o modo *smooth*, cuja finalidade é suavizar vibrações, naturais deste tipo de acionamento. A resolução pode variar entre 200 e 20.000, de acordo com a Figura 32. Esta possibilidade de configurar a resolução do passo do motor pode representar um recurso importante para a análise operacional do protótipo. Neste caso, pode ser possível ajustar a resolução em função da faixa de velocidade requerida pelo dispositivo. O modo *smooth*, por sua vez, pode mostrar-se mais apropriado para o

acionamento da Esteira Transportadora, já que as vibrações do Motor de Passo podem interferir na acomodação da pilha de pó sobre a esteira e no despejamento do material no Funil de Saída. A chave número 8 fornece opção de autoteste. Acionando-a, o motor executa duas voltas em ambos sentidos.

Figura 32 – Configuração de resolução de passo no *Driver STR8*



Fonte: Applied Motion Products (2018).

### 3.6.4 Interface de Controle do ADP

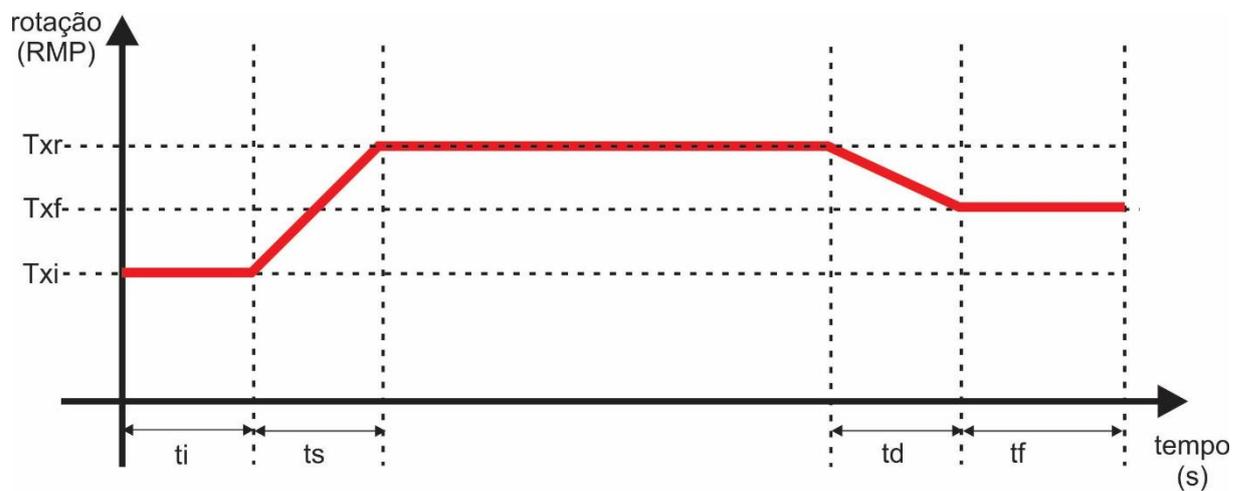
Os parâmetros de taxa de alimentação no processo PTA-P são regulados via *software* na fonte DigiPlus A7. A Figura 33 apresenta as telas do *display* da fonte e esquematiza a navegação no *software*. A função TAXA DEPOSIÇÃO, na primeira tela, fornece acesso às funções TAXA PO(RPM) e TEMPOS (S). Ao função TAXA PO(RPM), sinalizada com seta vermelha, dá acesso à tela 2, onde há as variáveis de rotação Txi (rotação inicial), Txr (rotação em regime) e Txf (rotação final). A função TEMPOS (S), sinalizada com seta amarela, dá acesso à tela 3, onde há as variáveis de tempo ti (tempo inicial), tf (tempo final), ts (tempo de subida) e td (tempo de descida). Este conjunto de parâmetros permite configurar níveis e rampas finais e iniciais, além da rotação de regime, correspondente à taxa de alimentação desejada no processo de soldagem. A Figura 34 apresenta um gráfico que ilustra os perfis de rotação (e, por consequência, da taxa de alimentação) ao longo do processo de soldagem, construído pela combinação dos parâmetros comentados.

Figura 33 – Telas do *display* da DigiPlus com funções e variáveis de configuração da taxa de alimentação no processo de soldagem



Fonte: Elaboração própria.

Figura 34 – Perfil de rotação e taxa de alimentação típico de processo de soldagem



Fonte: Elaboração própria.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO ADP

A pós a conclusão da fabricação do ADP de Esteira Transportadora, o protótipo foi submetido a testes analíticos para caracterização de suas propriedades operacionais. Os ensaios foram planejados para análise de três aspectos diferentes de operação, sendo eles:

- Inspeção Operacional;
- Calibração;
- Soldagem.

Os materiais envolvidos nos ensaios supracitados foram o Inox 316L Padrão, Inox 316L Fino e Ferro-Níquel. A Tabela 5 relaciona as principais propriedades destes particulados, com valores encontrados em outro trabalho [13].

Tabela 5 – Principais propriedades dos pós adotados para os ensaios

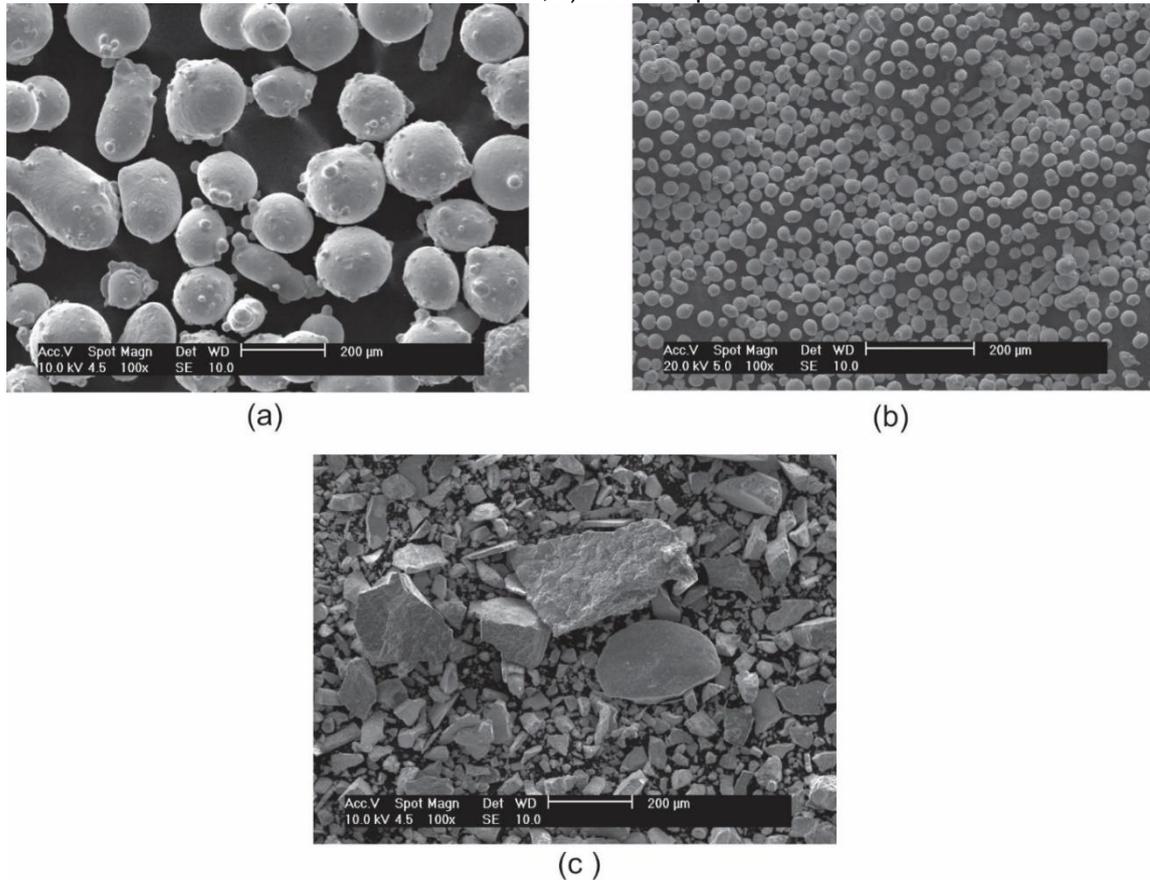
<b>Material</b>	<b>Morfologia</b>	<b>Granulometria</b>	<b>Densidade Aparente</b>
Inox 316L Padrão	Esférico	(50 a 150) $\mu\text{m}$	4,05 g/cm <sup>3</sup>
Inox 316L Fino	Esférico	(11 a 45) $\mu\text{m}$	4,14 g/cm <sup>3</sup>
Ferro-Níquel	Irregular	(15 a 500) $\mu\text{m}$	2,49 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 35, por sua vez, ilustra aspectos físicos dos referidos particulados, fornecendo imagens em mesma escala (200  $\mu\text{m}$ ) que permite contemplar o formato das partículas e obter noção comparativa entre os seus tamanhos.

Os materiais apresentados foram selecionados por representarem desafios para o ADP desenvolvido, em termos de morfologia e granulometria de partículas. Embora o Inox 316L Padrão apresente boa escoabilidade, representa uma condição que deve ser também aceita pelo dispositivo. Quanto ao Inox 316L Fino, apresenta baixa escoabilidade, impondo grandes dificuldades de alimentação. Por fim, o pó de Ferro-Níquel consiste em uma base já utilizada por pesquisadores de metalurgia para compor misturas experimentais. Fabricado por trituração, as partículas possuem formato irregular e não foi realizada nenhuma seleção granulométrica.

Figura 35 – Fotografias em MEV dos particulados adotados nos testes: a) Inox 316L Padrão; b) Inox 316L Fino; c) Ferro-Níquel



Fonte: Elaboração própria

A seguir serão explicadas as metodologias das atividades avaliativas anteriormente citadas.

#### 4.1 INSPEÇÃO OPERACIONAL

Este ensaio consiste em realizar uma averiguação visual do ADP durante operação de alimentação de pó. Foram realizadas três experiências, uma para cada material, inserindo no reservatório uma porção de 500 g e acionando a esteira na seqüência. Foram avaliados o comportamento do pó durante o escoamento dentro do reservatório, sobre a Esteira Transportadora e na saída da Mangueira de Transporte Pneumático.

Quanto ao acionamento da Esteira Transportadora, a resolução do passo do motor de 400 passos por volta foi adotada, por ser a menor resolução disponibilizada pelo *driver* que fornece também o modo *Smooth*. Assim, foram realizados ensaios para observar a influência da vibração do motor de passo no

padrão de queda do pó, da Esteira Transportadora para o Funil de Saída. Os testes consistiram em realizar um ensaio para cada pó, com acionamento em modo natural e outro em modo *Smooth*.

## 4.2 CALIBRAÇÃO

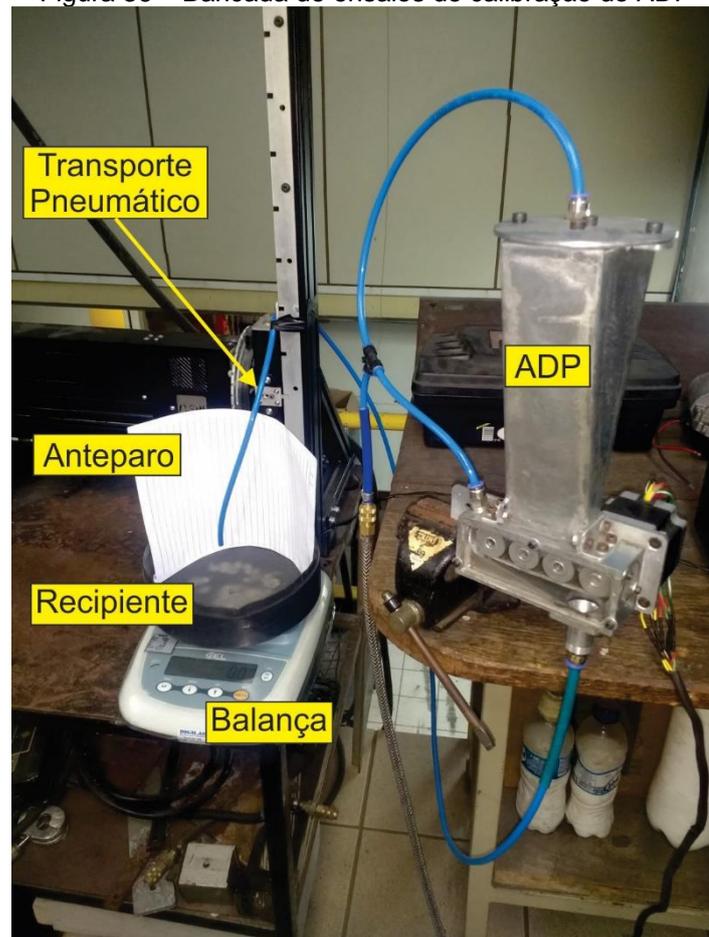
Os testes de calibração consistiram em realizar a medição da taxa mássica e volumétrica para os três tipos de particulados em função da rotação da Esteira Transportadora. Para cada rotação foram realizados três experimentos que consistiam, por sua vez, em filmar a evolução do valor de massa dispensada pelo ADP durante um minuto. Os ensaios basearam-se, como ilustra a Figura 36, em manter a saída da Mangueira de Transporte Pneumático acima de um recipiente em repouso sobre o prato de uma balança de precisão. Uma folha de papel foi utilizada como anteparo para impedir a ejeção de partículas para fora do recipiente. Assim, à medida que o pó era captado pelo receptáculo, a massa era indicada pela balança. Tais valores por sua vez eram registrados filmando-se o *display* da balança.

Usando um *software* de vídeo, a variação de massa ( $m_f - m_i$ ) correspondente ao intervalo de tempo ( $t_f - t_i$ ) no vídeo eram relacionados e, posteriormente, agrupados em planilha eletrônica. Os valores de taxa mássica ( $Txm$ ), em gramas por minuto (g/min), foram obtidos utilizando a equação 4. Já os valores de taxa volumétrica ( $TxV$ ) são calculados aplicando os valores de taxa mássica na equação 5.

$$Txm = \frac{m_f - m_i}{t_f - t_i} * 60 \quad (4)$$

$$TxV = \frac{Txm}{\rho_{ap}} \quad (5)$$

Figura 36 – Bancada de ensaios de calibração do ADP



Fonte: Elaboração própria.

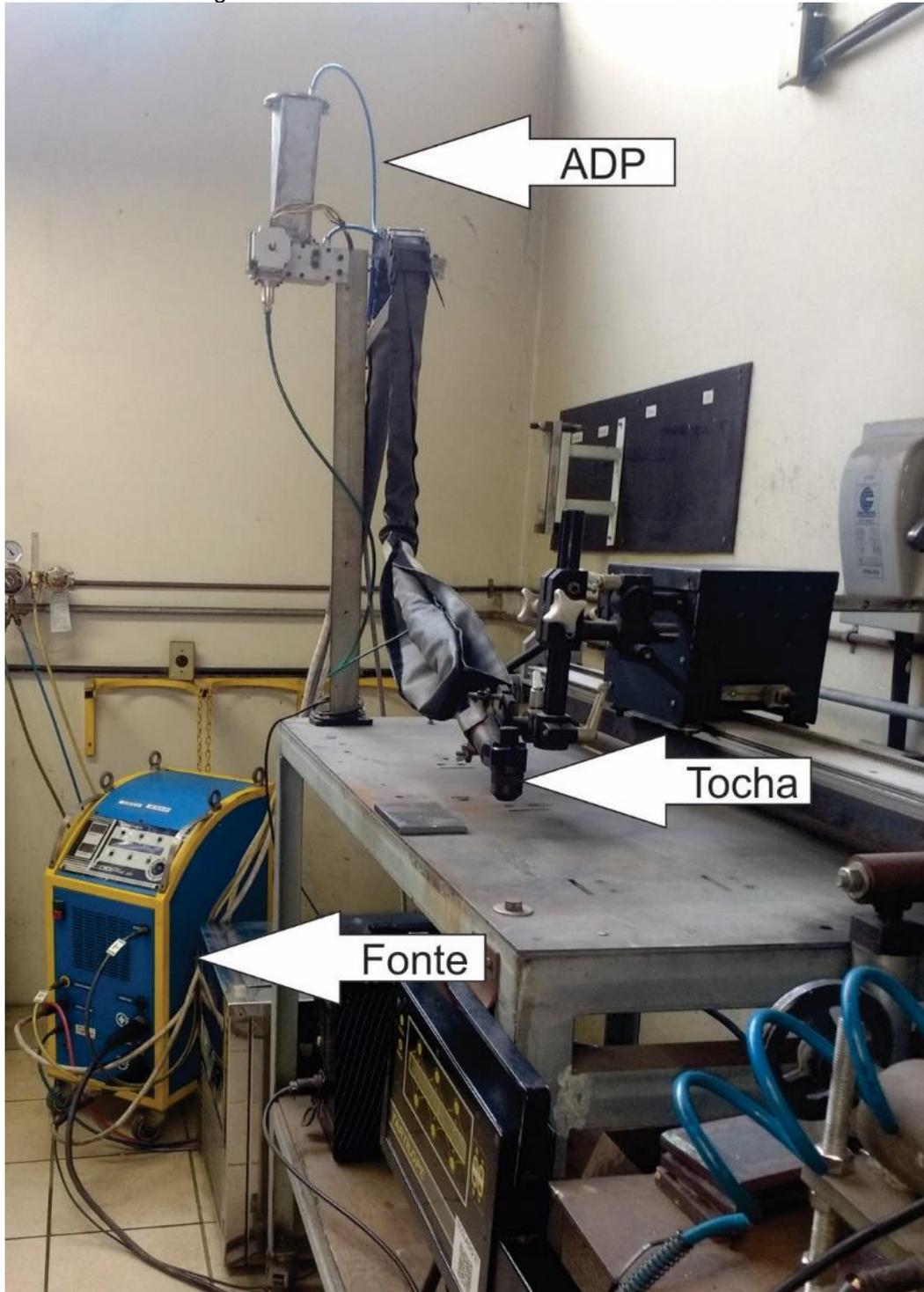
### 4.3 SOLDAGEM

Por fim, o desempenho do ADP de Esteira Transportadora foi avaliado em operações de soldagem. Os ensaios foram conduzidos na bancada PTA-P do laboratório de soldagem LABSOLDA, na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), conectando o ADP à Fonte de Soldagem e à tocha PTA-P. A Figura 37 ilustra a bancada PTA-P, enfatizando a localização do ADP desenvolvido.

Os ensaios consistiram em realizar o revestimento da face superior de uma peça produzida com uma barra chata de aço carbono com 3/8" de espessura. Tal peça possui dimensões 75 e 120 mm de largura e comprimento, respectivamente. O revestimento, por sua vez, será formado por sobreposição de cinco cordões de solda, produzidos com tecimento triangular. Os materiais de adição utilizados nos ensaios foram o Inox 316L Fino e o Inox 316L Padrão. O Inox 316L Fino foi escolhido por oferecer os maiores desafios para o ADP desenvolvido, com relação à escoamento e

manipulação. Já o Inox 316L Padrão foi escolhido para averiguar o desempenho do protótipo de ADP em soldagem com materiais tradicionais. A Tabela 6 relaciona os principais parâmetros de soldagem adotados para a produção dos revestimentos.

Figura 37 – Bancada PTA-P do LABSOLDA - UFSC



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 6 – Principais parâmetros de soldagem

<b>Parâmetros</b>	<b>valores</b>	<b>unidade</b>
Taxa Alimentação	1,850	kg/h
Gás Arraste	3,0	l/min
Txi (rotação do motor no início da alimentação)	0,1	rpm
ti (intervalo de tempo de início de alimentação)	0,5	s
ts (intervalo de tempo de subida da rampa de pó)	1,0	s
Txr (rotação do motor em regime de alimentação)	0,7	rpm
td (intervalo de tempo de descida da rampa de pó)	1,0	s
Txf (rotação do motor no final da alimentação)	0,1	rpm
tf (intervalo de tempo de final de alimentação)	0,5	s
Corrente de Soldagem	150	A
Velocidade de Soldagem	25,0	cm/min
Frequência	0,7	Hz
Amplitude	10,0	mm

Fonte: Elaboração própria.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Serão apresentados e discutidos, na devida sequência, os resultados obtidos nos ensaios de Comportamento do Pó no Dispositivo, Calibração e Soldagem.

### 5.1 INSPEÇÃO OPERACIONAL

Serão apresentadas nesta sessão aspectos do comportamento do pó em escoamento no Reservatório, no Mecanismo Manipulador e em Transporte Pneumático.

#### 5.1.1 Comportamento do Pó no Reservatório

Em termos de escoamento no reservatório, foi obtido o perfil de escoamento em massa para todos os consumíveis testados. Contudo, notou-se que a descarga do material ocorre preferencialmente na parte dianteira da esteira. A Figura 38 ilustra o evento pela observação da vista superior do reservatório, onde pode-se constatar o escoamento desequilibrado ocorrendo para os três materiais testados.

Embora não esperado, este fenômeno pode ser compreendido pelo sentido da rotação. As partículas da extremidade dianteira da pilha de pó são induzidas mais facilmente ao deslocamento, por não haver outras interferindo em sua frente.



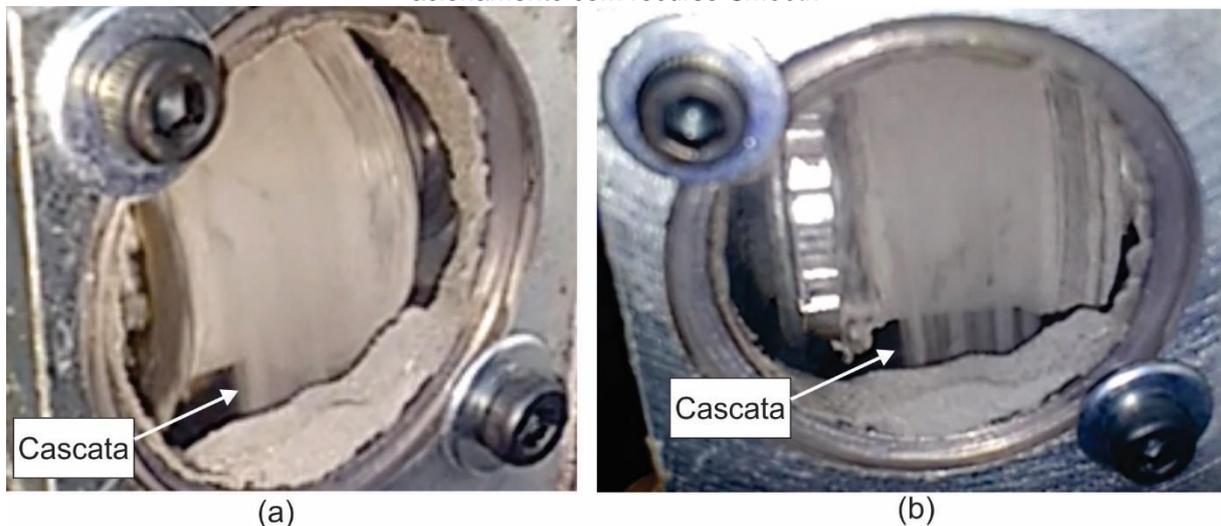
Fonte: Elaboração própria.

### 5.1.2 Comportamento do Pó no Mecanismo Manipulador

Com relação ao comportamento do material na Esteira Transportadora, visualizado através da Escotilha, observou-se que o particulado forma uma cascata de partículas ao deixar a correia.

Observando a queda do pó pela Escotilha, como mostrado na Figura 39, é possível constatar visualmente que há diferença nos perfis de queda em função do modo de acionamento. Utilizando o modo *Smooth* observa-se que o pó cai de forma menos constante, formando uma cascata com espessura irregular. Adotando o modo natural de acionamento observa-se perfil de queda visualmente mais constante. A vibração transmitida pelo motor de passo à Esteira Transportadora induz as partículas a caírem de forma mais independente, formando uma cascata com espessura mais regular.

Figura 39 – Perfil da cortina de pó em função do acionamento: a) acionamento natural; b) acionamento com recurso *Smooth*



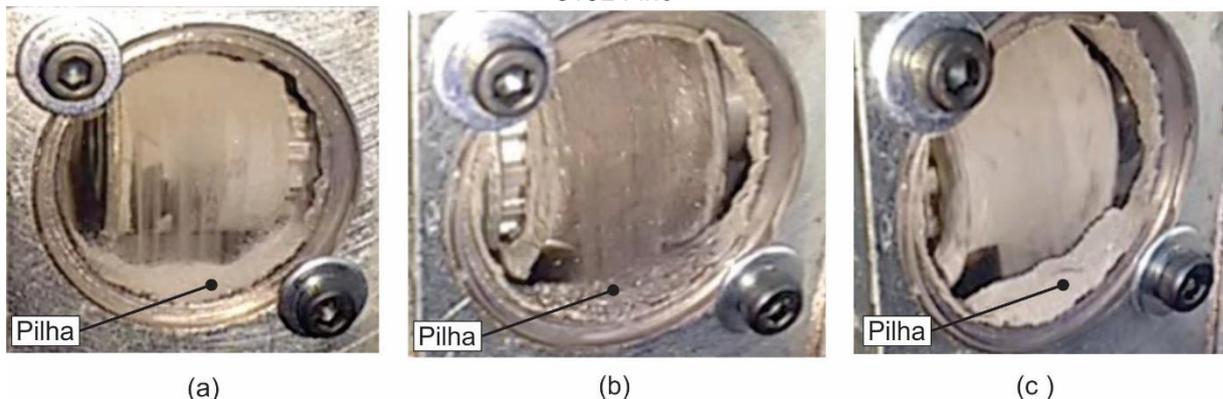
Fonte: Elaboração própria.

Independentemente do modo de acionamento do Motor de Passo, o perfil da cascata apresenta variações instantâneas em seu fluxo. Foram consideradas, como principais causas deste efeito, aspectos construtivos e dinâmicos do Mecanismo Manipulador. Durante a montagem, viu-se que as Polias de Apoio ficaram mais altas em relação às outras. Tal fato induz a variações geométricas da pilha de pó e leva a perturbações na alimentação. Outro aspecto nocivo à estabilidade da cascata de pó manifesta-se durante a rotação da Esteira Transportadora. Foram observadas

dificuldades no engrenamento das Polias de Apoio com a correia. Ciclicamente, os dentes da correia se sobrepõem aos dentes destas polias e, quando ocorre o reengrenamento, a correia desce repentinamente, variando a altura da pilha de pó. Este fenômeno é causado, por sua vez, por uma ligeira excentricidade dos furos de todas as polias. A variação do raio afasta a correia das polias e ocorre, em alguns momentos, a dessincronização da transmissão.

Um fato também inesperado consiste na formação de acúmulos de pó na Escotilha, ilustrado na Figura 40. Esta abertura ficou situada muito próxima à Esteira Transportadora, fazendo com que a cascata de pó atinja o rebaixo e retenha uma porção do material neste local. Para o Inox 316L Padrão e o pó de Ferro-Níquel, o fenômeno atinge estabilidade e não afeta significativamente o fluxo de pó. Entretanto, no caso do Inox 316L Fino, o acúmulo cresce até que ocorra uma avalanche. Tal evento, de caráter cíclico, provoca variações no fluxo de pó.

Figura 40 – Formação de pilhas de pó na Escotilha: a) Inox 316L Padrão; b) Ferro-Níquel; c) Inox 316L Fino



Fonte: Elaboração própria.

### 5.1.3 Comportamento do Pó em Transporte Pneumático

Com relação ao fluxo de pó em transporte pneumático, para todos os três materiais testados, ocorreu de forma contínua, como ilustra a Figura 41. Contudo, nos três casos, foram observadas variações instantâneas no jato. Tal fenômeno é reflexo das irregularidades na formação da cascata de pó ainda na Esteira Transportadora. No caso do 316L Fino, as avalanches que ocorrem no acúmulo da escotilha também provocam variações instantâneas.

Figura 41 – Fluxo de pó em Transporte Pneumático



Fonte: Elaboração própria.

## 5.2 CALIBRAÇÃO

Os dados resultantes dos testes de calibração estão agrupados nas tabelas 7, 8 e 9, de acordo com os respectivos materiais. Em cada tabela, os valores médios de taxa mássica de alimentação estão relacionados aos seus respectivos desvios-padrão. Estes últimos, por sua vez, também estão expressos nas tabelas em forma de percentagem, fornecendo noção proporcional das variações aleatórias na dosagem dos particulados. Os valores de taxa mássica foram obtidos pela média de 3 ensaios para cada rotação da Esteira.

Tabela 7 – 316L Fino

<b>Esteira (rpm)</b>	<b>Txm Média (g/min)</b>	<b>D. Padrão (g/min)</b>	<b>D. Padrão (%)</b>
1	11,9	1,6	13,4
2	31,0	3,3	10,6
3	47,3	4,7	9,9
4	58,3	5,1	8,7
5	72,3	6,7	9,3
6	81,2	7,1	8,7
7	93,5	7,9	8,5
8	96,0	8,0	8,3

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 8 – 316L Padrão

<b>Esteira (rpm)</b>	<b>Txm Média (g/min)</b>	<b>D. Padrão (g/min)</b>	<b>D. Padrão (%)</b>
1	14,8	1,5	10,1
2	31,1	3,5	11,2
3	48,1	4,4	9,1
4	63,5	5,9	9,3
5	74,5	5,4	7,2
6	85,4	4,6	5,4
7	94,0	8,2	8,7
8	98,0	9,2	9,4

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 9 – Ferro-Níquel

<b>Esteira (rpm)</b>	<b>Txm Média (g/min)</b>	<b>D. Padrão (g/min)</b>	<b>D. Padrão (%)</b>
1	5,8	1,0	17,3
2	12,7	2,1	16,5
3	17,8	2,8	15,7
4	24,6	3,4	13,8
5	30,0	5,3	17,7
6	38,1	4,3	11,3
7	43,4	5,0	11,5
8	48,0	6,8	14,2

Fonte: Elaboração própria.

Analisando as tabelas, é possível obter algumas informações importantes a partir dos desvios (percentuais), a saber:

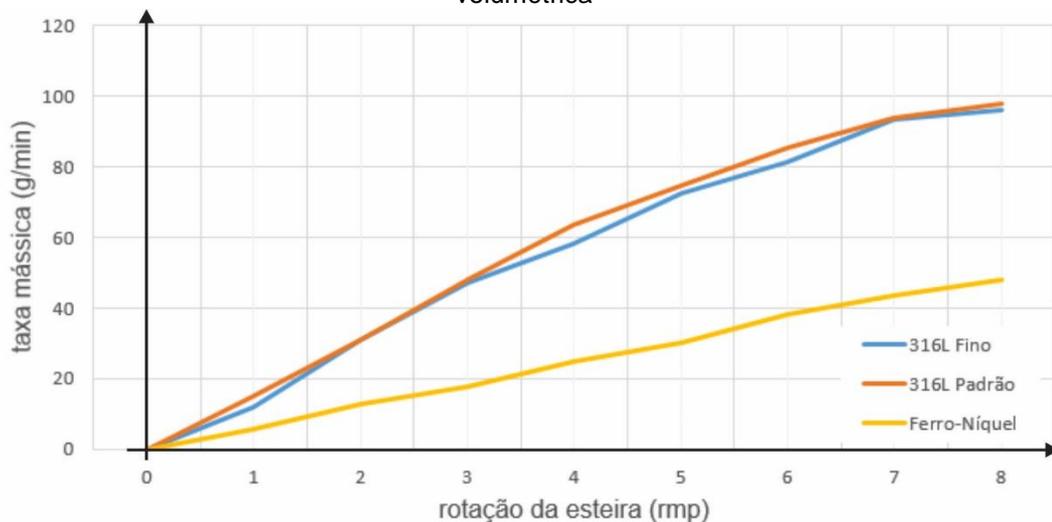
- Existe uma tendência geral de redução de variações aleatórias com o aumento da rotação da esteira. Esta tendência é mais tênue para o pó 316L Fino. Já para o 316L Padrão, em bora mais acentuada (chegando a quase 5%), volta a crescer em rotações mais altas. Para o Ferro-Níquel, por sua vez, esta tendência é menos clara.

- Os desvios-padrão para os materiais atomizados se mostraram menores em comparação aos materiais triturados. A maioria está compreendida em uma faixa

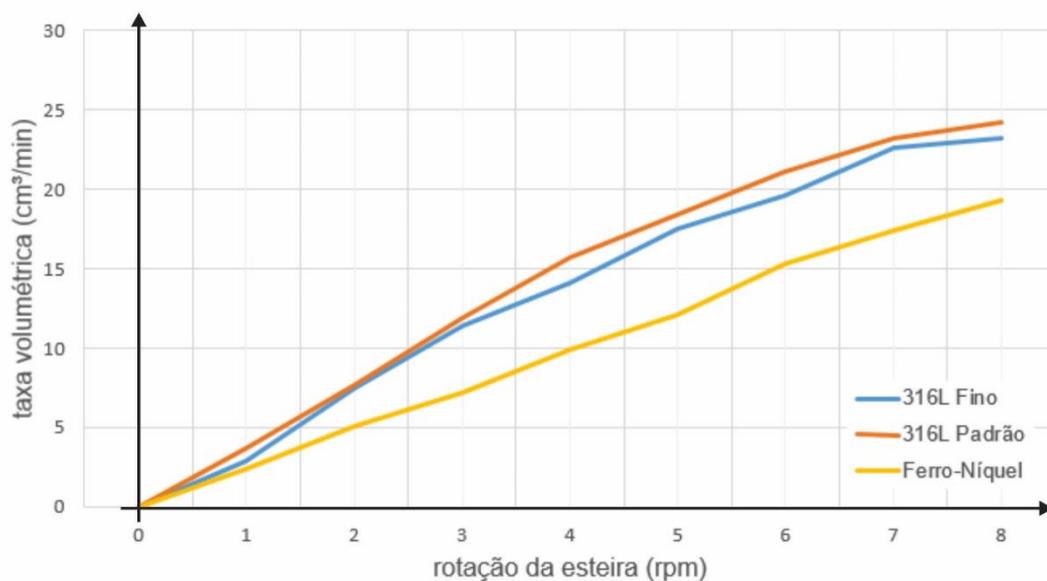
entre 5 e 10% da taxa mássica média. Por outro lado, esta faixa está entre 11 e 17%, no caso do pó triturado.

A partir dos dados de taxa mássica médias das tabelas, foram traçadas as curvas dos gráficos apresentados na Figura 42. A partir destes, é possível obter noção da linearidade da taxa mássica em função da rotação da esteira. Na Figura 42 (a) foi plotada a taxa mássica. A resposta volumétrica, na Figura 42 (b), foi obtida considerando a densidade aparente de cada material.

Figura 42 – curvas de calibração do ADP de Esteira Transportadora: a) taxa mássica; b) taxa volumétrica



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria.

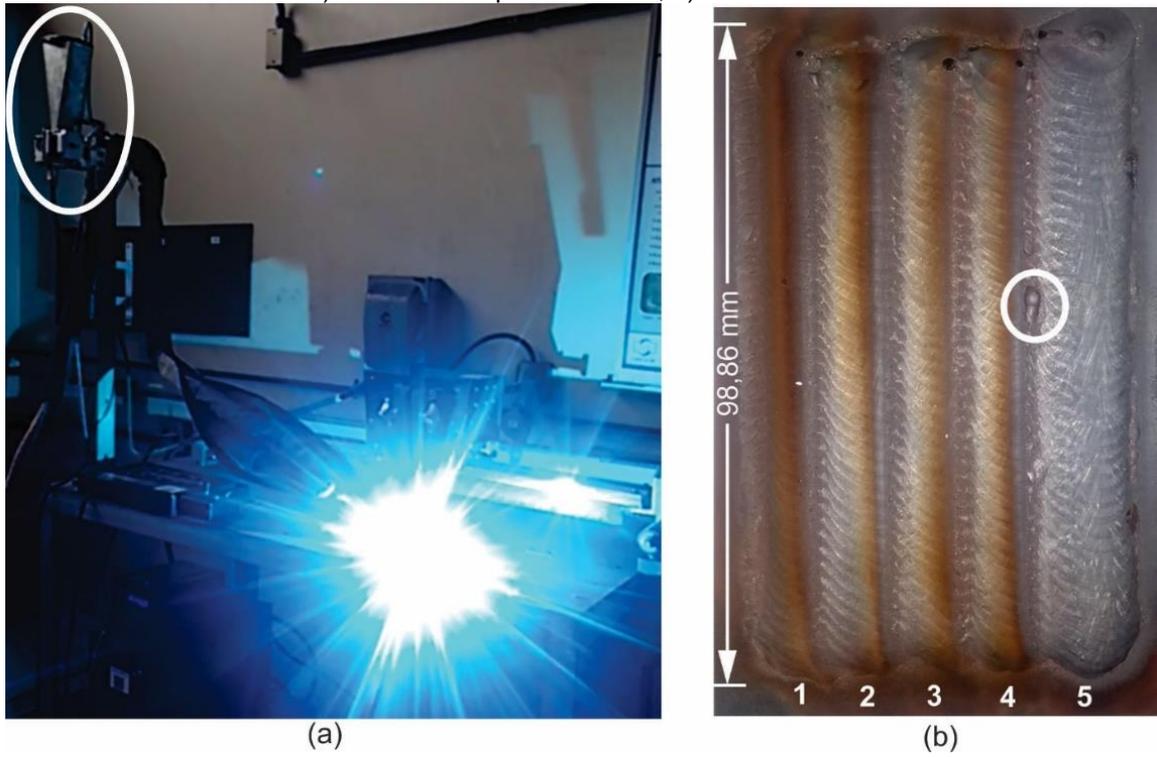
A partir da análise das curvas apresentadas podem ser constatados os seguintes fatos:

- A taxa mássica apresenta comportamento aproximadamente linear em função da rotação da esteira para os três materiais testados. Entretanto, os 316L Padrão e Fino apresentaram uma tendência assintótica a partir de 7 rpm da esteira.
- Os pós 316L, atomizados, embora de características granulométricas e de escoabilidade totalmente distintas, apresentaram características semelhantes de dosagem mássica e volumétrica. Para 8 rpm da esteira, o ADP forneceu taxa mássica de quase 100 g/min, ou 6 kg/h. A taxa volumétrica correspondente chegou a quase 25 cm<sup>3</sup>/min para estes materiais.
- O pó de Ferro-Níquel, triturado, apresentou taxa mássica inferior aos outros, em torno de 50% menor. Por exemplo, para 8 rpm da esteira, chegou em torno de 50 g/min, o que equivale a 3 kg/h. Apresentou, também, taxa volumétrica inferior aos outros, mas com diferença de apenas em torno de 20%.
- Para 1 rpm do pó 316L Padrão o ADP forneceu massa de 14,85 g, o que equivale a um volume dosado de 3,67 cm<sup>3</sup>, considerando sua densidade aparente de 4,05 g/cm<sup>3</sup>.
- Para 1 rpm do pó 316L Fino o ADP forneceu massa de 11,90 g, o que equivale a um volume dosado de 2,87 cm<sup>3</sup>, considerando sua densidade aparente de 4,14 g/cm<sup>3</sup>.
- Para 1 rpm do pó Ferro-Níquel o ADP forneceu massa de 5,79 g, o que equivale a um volume dosado de 2,33 cm<sup>3</sup>, considerando sua densidade aparente de 2,49 g/cm<sup>3</sup>.

### 5.3 SOLDAGEM

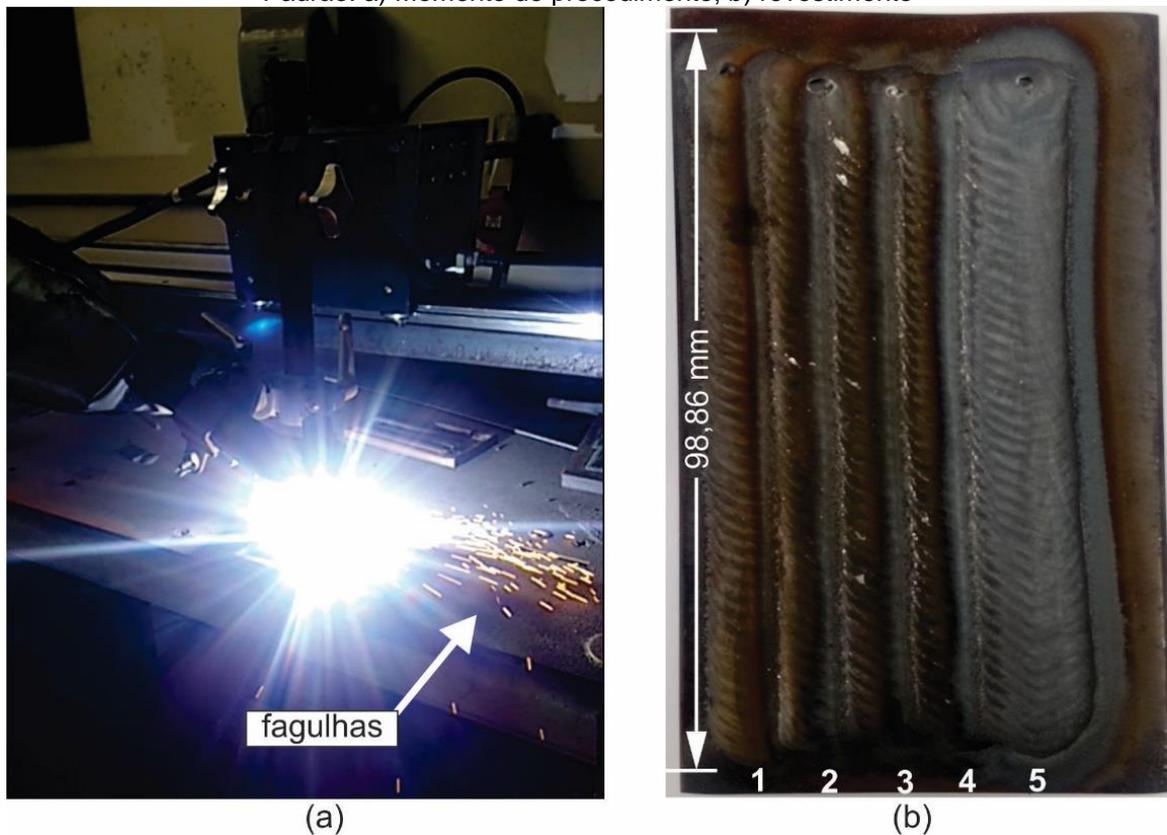
Uma imagem momentânea do processo de soldagem PTA-P realizado está apresentada na Figura 43, juntamente com o revestimento produzido com o ADP de Esteira Transportadora, operando com o pó Inox 316L Fino. O procedimento de soldagem com o pó Inox 316L Padrão e seu respectivo revestimento, por sua vez, estão apresentados na Figura 44.

Figura 43 – Operação de soldagem PTA-P com ADP de Esteira Transportadora e Pó Inox 316L Fino:  
a) Momento do procedimento; b) revestimento



Fonte: Elaboração própria

Figura 44 – Operação de soldagem PTA-P com ADP de Esteira Transportadora e Pó Inox 316L  
Padrão: a) Momento do procedimento; b) revestimento



Fonte: Elaboração própria

Durante os procedimentos não houve interrupção de alimentação de pó. O ADP foi mantido à 1 metro de altura em relação ao nível da mesa, como na posição sinalizada na Figura 43 (a). As condições de inicialização e finalização das soldas também ocorreram sem perturbações. Observou-se formação de fumos metálicos em maior quantidade na soldagem com o pó 316L Fino. Entretanto, não houve formação das tradicionais fagulhas, formadas por partículas incandescentes que atravessam o arco. Este fenômeno, contudo, ocorreu no procedimento de soldagem com o Inox 316L Padrão, como indicado na Figura 44 (a).

Os revestimentos apresentam acabamento superficial comparável ao que o processo PTA-P pode oferecer com os materiais padronizados. Os cinco cordões apresentam total semelhança entre si em termos geométricos, como se pode constatar nas figuras 43 (b) e 44 (b). Pode-se observar alta regularidade das bordas nas sobreposições, sem presença de pó não fundido ou mordeduras. A pelota de material na borda do último cordão na Figura 43 (b), envolta no círculo branco, ocorreu pela queda de uma gota metálica formada no canal de injeção do bico da tocha, fato que comumente ocorre em aplicações convencionais do PTA-P.

## 6 CONCLUSÕES

A realização deste trabalho proporcionou o desenvolvimento do ADP de Esteira Transportadora de forma ampla. Além do projeto e fabricação de um protótipo, o trabalho se estendeu à análise de suas características operacionais.

No que tange à inspeção operacional, é possível afirmar que cada componente cumpriu a função para a qual foi projetado, mesmo com ocorrência de fenômenos não previstos.

- O escoamento desequilibrado, ocorrido pela maior facilidade de movimentação das partículas da parte dianteira da pilha, não compromete o regime de escoamento para o qual o equipamento foi projetado. A ausência de defeitos de escoamento também sugere que o referido desequilíbrio não afeta o desempenho do ADP desenvolvido.

- A vibração natural do acionamento por motor de passo mostrou-se benéfica para a regularidade do fluxo de pó dispensado pela esteira. Embora esta regularidade possa ser prejudicada pelos acúmulos de pó ocorridos na Escotilha e imperfeições na fabricação, tais problemas podem ser corrigidos em um projeto futuro.

- A estanqueidade conseguida no equipamento garantiu pressurização interna e vazão adequada ao transporte de partículas. As perturbações instantâneas, em baixas faixas de alimentação, são reflexo dos problemas relacionados ao mecanismo manipulador.

Os ensaios de calibração do ADP permitiram constatar algumas características importantes, como:

- O mecanismo manipulador não fornece dosagem volumétrica dos pós embora, em alguns casos, se mostre aproximada às estimativas de projeto. As características morfológicas das partículas e a densidade aparente dos pós exerceram forte influência sobre a formação da pilha sobre a esteira.

- O ADP proporciona linearidade para taxa de alimentação. Este comportamento linear indica que as taxas mássica e volumétrica são dependentes quase que exclusivamente da rotação da esteira até limites superiores às faixas operacionais, com baixa influência de fenômenos aleatórios. Esta característica viabiliza a calibração do equipamento, embora necessário para cada pó que será utilizado no processo de soldagem.

O revestimento produzido, empregando o ADP de Esteira Transportadora, compõe-se de características que evidenciam desempenho satisfatório na alimentação do processo PTA-P, a saber:

- A conclusão de dois revestimentos compostos por cinco cordões é dependente de alimentação contínua, isenta de defeitos de escoamento.
- As variações instantâneas não se manifestaram na geometria dos cordões, tampouco no acabamento superficial dos revestimentos, sendo absorvidas pelo processo nas condições em que foi aplicado.
- As semelhanças entre os depósitos que constituem os recobrimentos refletem grau satisfatório de reprodutibilidade, concedida pelo alimentador ao processo PTA-P com materiais alternativos e padronizados.

Tendo em vista todos os resultados supracitados, o ADP desenvolvido mostrou-se capaz de operar com amplas faixas granulométricas e diferentes morfologias de partículas. Assim sendo, o processo de soldagem PTA-P pode ser agraciado com diversas vantagens.

As novas possibilidades em termos de morfologia e granulometria de partículas podem ampliar o campo de aplicação processo PTA-P. Maior tolerância a pós genéricos facilita a aquisição e deposição de materiais, muitas vezes, portadores de propriedades de grande interesse industrial.

Em outro âmbito, o ADP desenvolvido pode favorecer o uso do processo PTA-P como uma poderosa ferramenta científica, à disposição de pesquisas metalúrgicas na área de materiais. Isto porque misturas experimentais de materiais em pó podem ser mais facilmente obtidas e alimentadas no processo, de modo que o próprio metal de solda seja formado pela liga projetada.

Em uma última análise, o fato do ADP de Esteira Transportadora também ser capaz de operar com pós padrão PTA-P, lança-o como mais uma alternativa no universo dos alimentadores de pó para soldagem. Um recurso adicional, em termos de equipamentos, à indústria nacional da soldagem, setor tão dependente de tecnologias estrangeiras.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DEUIS, R. L. et al. **Metal-matrix composite coatings by PTA surfacing**. Composites Science and Technology, v.58, n. 2, p. 299-309, 1998.
- [2] SUN, Z.; HUANG, Z.H. **Micro-PTA powder cladding on a hot work tool steel**. Int. J. of Materials and Product Technology, v.13, ns. 3-6, p. 146-154, 1998.
- [3] MARCONI, M.; MARCONI, B. **Powder Plasma Arc Welding on Thick Walled Pipes**. International Institute of Welding, 16 p., Paper 11. 2005.
- [4] HUANG, X. et al. **Applications of PTA Powder Welding in Petroleum Chemical Industry**. Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Thermal Spray Conference, p. 1013-1017. Nice, mai. 1998.
- [5] RAGHU, D.; WEBBER, R. **PTA Proves its Worth in High-Volume Hardfacing Jobs**. Welding Journal, v. 75, n. 2, p. 34-40. Miami, fev. 1996.
- [6] BEWLEY, J.G. **High Production Hard Surfacing with Versatile Metal Powders**. Welding Design & Fabrication. p. 70-71. abr. 1978.
- [7] 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.
- [8] MARCONI, M. **I Riporti duri con polveri saldate con il processo P.T.A. (Plasma ad Arco Trasferito)**. Livro Online ([www.plasmateam.com](http://www.plasmateam.com)), 320 p. 2002.
- [9] WAHL, W.; KRAUSKOPF, F. **Plasma-arc Powder Surfacing of Ferrous Materials**. Welding and Cutting, n. 2, p. 15-16. Düsseldorf, fev. 1993.
- [10] 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.
- [11] ALVES, Jônathas Alexandre; **Revestimento de Martelos com Pó Experimental de Carboneto de Tungstênio e Liga de Níquel**. Relatório Interno LABSOLDA, 8p. Florianópolis, 13/02/2017.
- [12] FAYAL, Reinaldo Silva; **Avaliação de Pó Fe-Cr-Mn-Si-N Atomizado pela BRATS**. Relatório Interno LABSOLDA, 12p. Florianópolis, 26/04/2010.
- [13] 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.
- [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] MELLER, R. N. **Soldagem Automatizada na Fabricação do MVC de Árvores de Natal Utilizadas na Extração de Petróleo do Pré-Sal**. Trabalho de Conclusão de Curso - CTC/EMC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil: UFSC, 2015.
- [16] RIFFEL, K. C. **Avanços Tecnológicos do Processo TIG: Técnicas Inovadoras de Alimentação de Arame e Procedimentos Automatizados como Contribuição para a União de Tubos Internamente Cladeados**. 2018. 172p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

- [17] 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.
- [18] XIBAO, W.; HUA, L. **Metal Powder Thermal Behavior During the Plasma Transfer Arc Surfacing Process**. Surfacing and Coatings Technology, v. 106, n. 1-2, p. 156-161. Ago.1998.
- [19] DÍAZ, V. M. V. **Inovação do Equipamento e Avaliação do Processo Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó (PTA-P) para Soldagem Fora de Posição**. 2005. 198 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- [20] ASM Handbook. **Powder Metal Technology and Applications**. 9<sup>th</sup> ed. ASM International, 1998. Vol 7. p. 2762.
- [21] MARCONI, M. **I Riporti Duri con Polveri Saldate con il Processo P.T.A. (Plasma ad Arco Transferito)**. Livro Online ([www.plasmateam.com](http://www.plasmateam.com)), 320 p. 2002.
- [22] PRESCOTT, J.K.; BARNUM, R. A. **On Powder Flowability**. Pharmaceutical Technology, p. 60-84. Out.2000.
- [23] SCHULZE, D. **Powders and Bulk Solids – Characterization, Storage and Flow**. Berlin Heidelberg, New York: Springer, 2008. p. 461.
- [24] MARINELLI, J.; CARLSON, J. W. **Solve Solids Flow Problems in Bins, Hoopers and Feeders**. Article - American Institute of chemical Engineers, 1992. p. 10.
- [25] **Powder Technology Handbook**. 3rd ed. Florida: Taylor & Francis Group, 2006. p. 855.
- [26] McGLINCHEY, D. **Characterisation of Bulk Solids**. Glasgow Caledonian University: Blackwell Publishing, 2005. p. 280.
- [27] McGLINCHEY, D. **Bulk Solids Handling – Equipment Selection and Operation**. Glasgow Caledonian University: Blackwell Publishing, 2008. p. 303.
- [28] **PM-10 Powder Feeder**. Disponível em [www.plasmamaster.com.ua](http://www.plasmamaster.com.ua). Acesso em set. 2018.
- [29] OWEN, P. J.; CLEARY, P. W. **Screw Conveyor Performance: Comparison of Discrete Element Modelling with Laboratorie Experiments**. 7<sup>th</sup> Internacional Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, Melbourne, 2009, p. 7.
- [30] GIBILARO, L.G. **Fluidization Dynamics – The Formulation and Applications of a Predictive Theory for the Fluidized State**. 1<sup>st</sup> Ed. L'Aquila: Butterworth-Heinemann, 2001. p. 256.
- [31] LACERDA Jr, W. M.; CARVALHO, F. M.; ATAÍDE, C. H. **Caracterização de Regimes de Fluidização Através da Análise de Flutuação de Pressão no Leito**. Universidade Federal de Uberlândia, artigo, p. 24.
- [32] DECHSIRI, C. **Particle Transport in Fluidized Beds**. 2004. 177 f. Tese (Doutorado) – Universidade de Groningen.
- [33] LIPPOLD, J.C.; KOTECKI D.J. **Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels**. Wiley Interscience, 2005. p. 77.
- [34] ALVES, J. A. **Análise do Comportamento do ADP PM-10 na Dosagem e Transporte de Consumíveis na Soldagem PTA-P**. Relatório Interno LABSOLDA, 19 p. Florianópolis, 02/07/2009.

[35] **Manual Motor de Passo NEMA 23 KTC-HT23-397**. Disponível em: [www.kalatec.com.br](http://www.kalatec.com.br). Acesso em abr. 2018.

[36] **Manual Fonte DigiPlus A7**. Disponível em: [www.imc-soldagem.com.br](http://www.imc-soldagem.com.br). Acesso em out. 2018.

[37] **Guia de Configuração do *Driver* STR4/8**. Disponível em: [www.applied-motion.com](http://www.applied-motion.com). Acesso em jul. 2018.