

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

Jônathas Alexandre Alves

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO
DE CONSUMÍVEIS EM PÓ PARA SOLDAGEM PTA-P COM
CAPACIDADE PARA MANIPULAÇÃO E TRANSPORTE EM
OPOSIÇÃO À GRAVIDADE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng.

Co-orientador: Regis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng.

Florianópolis, 2011.

Catálogo na fonte elaborada pela biblioteca da
Universidade Federal de Santa Catarina

A474d Alves, Jônathas Alexandre
Desenvolvimento de um sistema de alimentação de consumíveis
em pó para soldagem PTA-P com capacidade para manipulação e
transporte em oposição à gravidade [dissertação] / Jônathas
Alexandre Alves ; orientador, Jair Carlos Dutra. -
Florianópolis, SC, 2011.
122 p.: il., grafs., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia mecânica. 2. Revestimentos - Soldagem.
3. Processo Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó.
I. Dutra, Jair Carlos. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
III. Título.

CDU 621

Jônathas Alexandre Alves

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO
DE CONSUMÍVEIS EM PÓ PARA SOLDAGEM PTA-P COM
CAPACIDADE PARA MANIPULAÇÃO E TRANSPORTE EM
OPOSIÇÃO À GRAVIDADE**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Florianópolis, 08 de agosto de 2011.

Prof^o. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng.
Orientador

Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng.
Co-Orientador

Prof^o. Julio Cesar Passos, Dr. Eng.
Coordenador do curso

Banca Examinadora:

Prof^o. Fernando Antônio Forcellini, Dr. Eng.
Presidente

Prof^a. Ana Sofia Clímaco M. d'Oliveira, Ph.D.
Membro

Raul Gohr Júnior, Dr. Eng.
Membro

Aos meus pais José e Maria de
Lourdes,
Meus irmãos Kátia, Kelly, Karen e
José Antônio,
À minha esposa Patrícia.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos às pessoas que, de alguma forma, colaboraram com a realização deste trabalho, especialmente:

A meus mestres: Dr. Eng. Hélio Ormeu Ribeiro pela indicação, entusiasmo e incentivo em suas aulas de Automação da Soldagem; Ms. Eng. Mário Lúcio Roloff pela iniciação científica; Dr. Eng. Nelso Gauze Bonacorso pela recomendação, pelos conhecimentos transmitidos ao longo da minha vida acadêmica e pelo apoio durante o curso de mestrado.

A meus Orientadores: Prof^o Jair Carlos Dutra por suas valorosas lições, pela orientação e oportunidade de participar deste competente grupo de pesquisa; Dr. Eng. Régis Henrique Gonçalves e Silva pela Co-Orientação e conhecimentos a mim repassados através da atuação direta e integral neste trabalho.

Ao Dr. Eng. Raul Gohr Jr., pelo apoio fundamental na bancada de ensaios; Ao Dr. Eng. Carlos Henrique Niño, pela colaboração nas primeiras pesquisas científicas que fundamentaram este trabalho.

Aos pós-graduandos da equipe do LABSOLDA pelo coleguismo e troca de conhecimentos: Fernando Costenaro, Mateus Barancelli, Eduardo Bidese, Reinaldo Fayal, Júlio Ribeiro, Rafael Polezi, Felipe Kalil, Diego dos Santos, Erwin Teichmann, Renon Carvalho, Miguel Guayasamin, Marcelo Okuyama, Fábio Michelin e Diego dos Santos.

Aos bolsistas de graduação (pela assistência e companheirismo) Leonardo Brügemann, Ezequiel Gonçalves, Hellington Direne, Fernando Cechinel, João Facco, Diogo Coletto, Marcus Barnetche e Vítor Lauth.

Aos técnicos Ricardo Campagnin, Roberto Pereira, Evandro Martins, Cleber Guedes, Gilmar Ribeiro. Às secretárias Márcia Thiel e Sarrie da Costa.

À empresa TRACTEBEL ENERGIA S.A. (em especial ao Eng. Fernando Ribas) por, mais uma vez, apostar na equipe do LABSOLDA, financiando pesquisas contributivas ao desenvolvimento de ciência e tecnologia no campo da soldagem no Brasil.

Ao CNPq pelo suporte em forma de bolsas de estudo, taxa de bancada e apoio no financiamento das atividades de Pesquisa e Desenvolvimento que tornaram possível a realização deste trabalho.

RESUMO

Acometidas pelo fenômeno da cavitação, pás de turbinas hidráulicas de usinas hidrelétricas exigem periódicas operações de reparo das áreas desgastadas. Estas atividades, conduzidas por soldagem, ainda mostram-se passíveis do desenvolvimento de novas tecnologias. Neste contexto, o LABSOLDA – Instituto de Mecatrônica da UFSC propõe conferir flexibilidade e robustez ao processo PTA-P, buscando a aplicabilidade do mesmo em qualquer posição de soldagem e no desenvolvimento de consumíveis. A impossibilidade de posicionamento adequado das turbinas, devido às grandes dimensões e geometria complexa de suas pás, exige a execução de soldas em posições forçadas. Já a utilização do consumível de solda na forma de pó pelo referido processo viabiliza a concepção de novas ligas, a partir de misturas experimentais. Inevitavelmente, estas acabam por envolver pós metálicos de características morfológicas e granulométricas não compatíveis com as tradicionais. Tais características comprometem o desempenho dos alimentadores de pó, dificultando a obtenção de depósitos de qualidade. Após confirmar-se a deficiência dos sistemas de alimentação de pó disponíveis na execução destas tarefas, foi decidido por um desenvolvimento próprio, originando o sistema denominado de ADP VR-F. Trata-se de um alimentador de pó projetado para viabilizar a soldagem fora de posição com robustez e qualidade, permitindo a aplicação do PTA-P nas turbinas. Seu projeto também apresenta características dedicadas à manipulação de materiais diferentes dos tradicionais, favorecendo o desenvolvimento de ligas. O presente trabalho disponibiliza informações sobre o seu desenvolvimento mecânico, baseado em estudos realizados com dois outros alimentadores disponíveis. Também apresenta o desenvolvimento eletroeletrônico e de sua programação, de acordo com a filosofia de controle adotada. Experiências empreendidas para validação do equipamento são abordadas neste trabalho, procurando caracterizar suas propriedades de alimentação e revelar seu desempenho em atividades de soldagem, incluindo participação no desenvolvimento de uma liga resistente à cavitação e na aplicação do processo PTA-P em campo. O equipamento respondeu aos testes de forma positiva, mostrando-se capaz de manipular pós compostos por partículas de diversas morfologias e faixas granulométricas. Também foi essencial para o desenvolvimento de uma liga de alta resistência à cavitação, sendo o único disponível capaz de manipular um dos materiais testados. Por fim, permitiu a aplicação do

processo PTA-P com robustez e qualidade em posições forçadas, proporcionando depósitos de ligas experimentais nas próprias turbinas hidráulicas.

Palavras-chave: Revestimento, Plasma Pó, Posições forçadas, Alimentador de pó.

ABSTRACT

Damaged by the Cavitation Phenomenon, hydraulic turbine blades of hydroelectric plants require cyclic operations to restore worn areas. These activities, conducted by welding, still have potential for new technology development. In this context, the UFSC Mechatronics Institute – LABSOLDA proposes to provide flexibility and robustness to the PTA process, searching its applicability in any welding position and in alloys development. The impossibility of turbine appropriate positioning, due to the large size and complex geometry of their blades, requires the execution of welds in awkward positions. But the use of additional material in powder form by this process enables new alloys design, from experimental mixtures. Inevitably, its end up involving metal powders morphology and particle size not compatible with traditional standards. These characteristics impair powder feeders performance, making its compromises the weld quality. After confirmation the available powder feed systems deficiency in these tasks, it was decided by an own development, resulting in the ADP system called VR-F. It was a powder feeder designed to enable the welding in awkward positions with robustness and quality, allowing the application of PTA process in the turbines. Its design also has characteristics dedicated to the manipulation of materials different from traditional, favoring alloys development. This paper provides information on its mechanical development, based on studies with two other feeders available. It also presents the electronic and programming developments, according to the adopted philosophy control. Experiments undertaken for equipment validation are discussed in this paper, seeking to characterize their feed properties and reveal his performance in welding activities, including in an anti-cavitation alloy development and in PTA turbines application. The equipment was responded positively to the tests, being able to handle powders composed by various particle sizes and morphology. It was also essential for anti-cavitation alloy development, being the only feeder available capable to handling one of involved materials. Finally, it allowed the PTA application with robustness and quality in awkward positions, providing experimental alloys deposits in hydraulic turbines.

Keywords: recovering, plasma powder, awkward positions, powder feeder.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema de uma tocha PTA-P genérica em corte associando sua tecnologia aos principais elementos envolvidos no processo.....	8
Figura 2.2 – Relação entre taxa de alimentação de pó e vazão de gás de arraste utilizadas no processo PTA-P, Deuis [10].....	9
Figura 2.3 – Processos de fabricação de pós utilizados no processo PTA-P, Klein [13]: a) processo de atomização; b) pó atomizado; c) processo de trituração; d) pó triturado	10
Figura 2.4 – Histograma de faixa granulométrica de um material entre 100 e 160 μm , Marconi [14].....	12
Figura 2.5 – Padrões de escoamento de pós em silos, Schulze [17]. Escoamento em massa (esquerda) e escoamento em funil (direita)	13
Figura 2.6 – Medição dos coeficientes de fricção, ASM Handbook [12]: a) aparato para determinação de fricção externa; b) aparato para determinação de fricção interna	14
Figura 2.7 – Exemplos de situações de não-escoamento, ASM Handbook [12]: a) escoamento interrompido por arco; b) escoamento interrompido por caminho de rato	15
Figura 2.8 – Métodos para determinação do ângulo de empilhamento, Powder Technology Handbook [19]	16
Figura 2.9 – Leito de jorro de arroz, www.ufrnet.br [22].....	18
Figura 2.10 – Regimes de fluidização, Lacerda, Carvalho e Ataíde [24]	18
Figura 2.11 – Gráfico de classificação de partículas de Geldart, Handbook of Fluidization [26].....	19
Figura 2.12 – Mecanismos de alimentação de materiais granulados, McGlinchey [27]: a) alimentador de fuso; b) alimentador tipo Venturi; c) válvula rotativa; d) alimentador de esteira	20
Figura 2.13 – Alimentadores de pó comerciais para PTA-P: a) ADP de Fuso Plasma Team; b) ADP de Fuso Alloys International; c) ADP de Tambor Eutectic Castolin; d) ADP de Tambor Plasma Master.....	22
Figura 2.14 – Métodos de acionamento de motores, Carvalho [31]: a) acionamento em Malha Aberta; b) acionamento em Malha Fechada com servo motor; c) acionamento em malha fechada com servo motor e servo <i>driver</i>	23
Figura 2.15 – Sinais de comando tipicamente empregados: a) sinal <i>Step</i> ; b) sinal <i>Dir</i>	24

Figura 3.1 – ADP de Fuso [8]: a) esquema de funcionamento; b) Alimentador fabricado	28
Figura 3.2 – Controle do ADP de Fuso: a) gabinete e IHM; b) opção de controle de rotação do fuso na IHM.....	28
Figura 3.3 – Transporte contra a gravidade: a) posicionamento da tocha para soldagem na posição sobre-cabeça [8]; b) pequeno jato de partículas e seta indicando precipitação de pó dentro da mangueira de transporte pneumático	29
Figura 3.4 – Depósitos produzidos com o emprego do ADP de Fuso [9]: a) cordão confeccionado com 0,26 kg/h; b) cordão produzido com 0,48 kg/h	30
Figura 3.5 – Características de alimentação do ADP de Fuso: a) dispensa de pó pelo parafuso (intervalos de 1,6 s) indicada pelas setas amarelas; b) defeitos causados pelas irregularidades de alimentação: Setas brancas indicam influência das perturbações, a amarela indica um vazio criado por este defeito e a vermelha, um cordão defeituoso	31
Figura 3.6 – Simulação do comportamento de pós transportados por parafuso [32]: a) para partículas esféricas; b) ovais; c) cúbicas;.....	31
Figura 3.7 – ADP de Fuso: a) Sistema com a Câmara de Diafragma acoplada (sinalizado com um círculo); b) desenho esquemático da Câmara de Diafragma	32
Figura 3.8 – Câmara de Vibração por Alto-Falantes: a) foto do aparato; b) vista superior interna da base da câmara; c) circuito pneumático; d) circuito elétrico	33
Figura 3.9 – Câmara de Batente excêntrico: a) desenho esquemático; b) vista frontal com furadeira (1), bomba de gasolina (2) e reservatório (3); c) detalhe do contato entre o batente e o transmissor de movimento.....	34
Figura 3.10 – Fluidizador: a) esquema de funcionamento; b) protótipo fabricado	35
Figura 3.11 – Soldagem envolvendo o Fluidizador: a) bancada de ensaios com 1- ADP de Fuso, 2- Fluidizador e 3- Tocha de Soldagem; b) aspecto do jato de partículas expelido pela mangueira de 2,0 mm; c) aspecto de um revestimento produzido sem Fluidizador; d) aspecto de um revestimento produzido com Fluidizador	36
Figura 3.12 – ADP de Tambor: a) produto comercial e seu gabinete de controle [34]; b) estrutura em corte frontal. Principais itens: 1- Tambor; 2- Tubo de Queda; 3- Base do Silo; 4- Nônio; 7- entrada de gás; 8- conexão gasosa Silo-Tambor; 10- Visor; 11- conexão com linha pneumática [35]	38

Figura 3.13 – Opções de regulação da taxa de alimentação: a) potenciômetro (seta vermelha) e chave de habilitação (seta amarela); b) escala e nônio para regulação do gap.....	39
Figura 3.14 – Testes submetendo o ADP de Tambor ao transporte contra a gravidade, relatório LABSOLDA [36]: a) bancada de ensaios; b) Precipitação do pó na linha de transporte pneumático	40
Figura 3.15 – Defeito de escoamento de caminho de rato, relatório LABSOLDA [36]: a) Pó Fe-Ni Triturado; b) Inox 316L (+45-90 μm); c) Bronze (+40-200 μm).....	41
Figura 3.16 – Manipulação de pós alternativos (fotos extraídas em intervalos de 2 s): a) variação do volume de pó formado no <i>gap</i> ; b) alimentação pulsada do Inox 316L; c) alimentação pulsada do Bronze	42
Figura 3.17 – Cordões realizados com alimentação perturbada (números indicam a velocidade de soldagem empregada): a) Inox 316L; b) Bronze	42
Figura 3.18 – Comportamento da taxa de alimentação em função da rotação do Tambor Dosador, relatório LABSOLDA [36]: a) taxa mássica; b) taxa volumétrica	43
Figura 3.19 – Comportamento da taxa mássica em função da variação do <i>gap</i> , relatório LABSOLDA [36]	44
Figura 3.20 – Imagens da pilha de pó formada no <i>gap</i> de acordo com as alturas indicadas no canto superior esquerdo de cada ilustração (em mm), relatório LABSOLDA [36].....	44
Figura 4.1 – Principais componentes do ADP VR-F e suas funções	48
Figura 4.2 – ADP VR-F: a) visão geral do equipamento fabricado; b) projeto em CAD com Silo (contorno em preto), Válvula Rotativa (contorno azul) e Fluidizador (contorno em vermelho).....	49
Figura 4.3 – Componentes e acessórios do ADP VR-F	50
Figura 4.4 – Desenho do Silo em ambiente CAD: a) vista explodida da estrutura; b) estrutura em corte frontal com principais canais.....	52
Figura 4.5 – Canais de descarga: a) ADP de Fuso Horizontal; b) ADP VR-F.....	52
Figura 4.6 – Determinação da inclinação da base, Ribeiro [9]: a) modelo original da base do ADP de Fuso; b) base com inclinação reavaliada; c) procedimento de medida do ângulo de empilhamento	53
Figura 4.7 – Detalhes de projeto do Silo do ADP VR-F: a) fenômeno de retenção de partículas nas bordas do silo do ADP de Fuso adaptado; b) providências tomadas no projeto do novo Silo.....	54
Figura 4.8 – Válvula Rotativa projetada em CAD: a) vista explodida; b) mecanismo montado em corte frontal (com exceção do Rotor).....	55

Figura 4.9 – Manipulação de materiais pelo mecanismo da Válvula Rotativa: a) esquema de manipulação do pó no interior do mecanismo; b) imagem da Válvula Rotativa em operação	56
Figura 4.10 – Desgaste no primeiro protótipo da Válvula Rotativa: a) desgaste no corpo indicado por setas (formação de duas pistas côncavas); b) desgaste nas bordas das Cavidades do Rotor (áreas circuladas); c) fenômeno de cisalhamento com setas vermelhas indicando esforços do Rotor e do Corpo da Válvula contra partículas de pó	57
Figura 4.11 – Corpo da Válvula revestido internamente pela Manta de Silicone. Nos detalhes, a diferença de nível entre a superfície da manta e dos posicionadores	58
Figura 4.12 – Acessórios: a) junta de vedação; b) rolamento; c) O’Ring; d) Acoplamento.....	59
Figura 4.13 – Novo Fluidizador: a) vista explodida; b) vista frontal em corte da estrutura.....	60
Figura 4.14 – Fluidizador em operação.....	61
Figura 4.15 – Esquema de atenuação de perturbações no Fluidizador (deslocamento das partículas indicado pelas setas): a) leito em situação de regime por alimentação contínua; b) manutenção da altura do leito no canal diluído por si próprio; c) redução da altura do leito no canal diluído por falta de partículas se deslocando	62
Figura 4.16 – Mangueiras empregadas para transporte pneumático com números indicando diâmetro interno: a) mangueiras Cristal de PVC; b) mangueiras de poliuretano	64
Figura 4.17 – Motor selecionado, Manual do Fabricante [40]: a) Imagem do AK57H/3G20-1,8; b) Curva de torque em função da frequência de pulsos	65
Figura 4.18 – Driver selecionado para acionamento do ADP VR-F, Guia do Usuário [41]: a) Imagem do STR8 em perspectiva; b) detalhes das interfaces para configurações e conexões	67
Figura 4.19 – Placa de controle com IHM integrada	68
Figura 4.20 – Interior do gabinete da unidade de controle do ADP VR-F	68
Figura 4.21 – Esquema de ligações elétricas da Unidade de Controle: a) circuito de potência; b) circuito de sinais.....	69
Figura 4.22 – Interfaces do Gabinete de Comando: a) parte frontal com IHM; b) parte traseira com conexões.....	70
Figura 4.23 – Fluxograma do programa principal do software de controle	74

Figura 4.24 – Telas das funções de Rotação e Taxa Mássica associadas às suas respectivas unidades.....	74
Figura 4.25 – Fluxograma da Função Rotação.....	75
Figura 4.26 – Telas de Função Rotação: a) entrada de valor de rotação; b) alimentação de material; b) pausa na alimentação	75
Figura 4.27 – Fluxograma da Função Taxa Mássica.....	76
Figura 4.28 – Telas de Função Taxa Mássica: a) entrada de valor de Taxa Mássica; b) sequência de instruções para entrada de valor de Densidade Aparente	76
Figura 5.1 – Pós metálicos utilizados em testes de avaliação do ADP VR-F: a) COG 150; b) COG 200; c) Inconel 625; d) Inox 316L; e) Fe-Ni; f) Bronze pré-ligado; g) Manganês	80
Figura 5.2 – Bancada para ensaios de repetitividade e linearidade	82
Figura 5.3 – Procedimento para determinação da densidade aparente: a) escoamento do material do funil para o recipiente; b) material excedente no topo do recipiente; c) planificação da superfície do pó; d) pesagem da massa contida no recipiente; e) procedimento com funil alternativo para pós de difícil escoamento; f) Aparato de Hall em ambiente CAD	83
Figura 5.4 – Sequências de imagens da saída da linha de transporte pneumático do ADP VR-F: a) COG 150; b) COG 200; c) Inconel 625; d) Bronze; e) Inox 316L Fino; f) Fe-Ni; g) Manganês	84
Figura 5.5 – Linearidade do ADP VR-F na dosagem dos sete materiais selecionados: a) linearidade mássica; b) linearidade volumétrica.....	87
Figura 5.6 – Bancada de soldagem PTA-P (LABSOLDA).....	89
Figura 5.7 – Fonte de soldagem Digiplus A7: a) periféricos de soldagem integrados à fonte; b) IHM [42]; c) elementos da IHM [42].....	90
Figura 5.8 – Tochas de soldagem PTA-P envolvidas nas experiências: a) tocha PLP 300; b) Tocha PTA-P do LABSOLDA.....	91
Figura 5.9 – Sequência de telas de controle do ADP VR-F (setas indicam a função selecionada): sequência 1 – configuração da taxa mássica; sequência 2 – configuração de rotação	92
Figura 5.10 – Processo de análise geométrica dos cordões: a) dimensões do depósito e delimitação das áreas; b) tela do <i>software</i> de medição, Silva [6].....	93
Figura 5.11 – Comparação de desempenho na alimentação de pós alternativos (números indicando a velocidade de soldagem): a) Inox 316L-90 alimentado com ADP de Tambor; b) Inox 316L-90 alimentado com VR-F; c) Bronze alimentado com ADP de Tambor; d) Bronze alimentado com VR-F.....	95
Figura 5.12 – Operações de soldagem envolvendo o pó BRTS e o ADP de Tambor, Fayal [43]: a) fenômeno da magnetização do pó na	

extremidade do tubo de queda; b) características do pó atomizado a água; c) aspecto superficial do revestimento	96
Figura 5.13 – Revestimento produzido com o ADP VR-F usando o pó BRTS, Fayal [43]: a) revestimento com detalhe da superfície; b) CP 01A com poros indicados pelas setas e vazios dentro do círculo	97
Figura 5.14 – Novo revestimento produzido com o ADP VR-F usando o pó BRTS, Fayal [44]: a) aspecto do revestimento; b) CP 01B após ensaio de cavitação	97
Figura 5.15 – Revestimento com Stenox empregando 5 l/min: a) aspecto superficial do revestimento; b) macrografia de um dos cordões da primeira camada; c) aspecto do corpo de prova para teste de cavitação após ensaio de líquidos penetrantes	99
Figura 5.16 - Revestimento com Stenox empregando 2,5 l/min: a) aspecto superficial do revestimento; b) corpo de prova sujeito a ensaio de cavitação em 1; corpo de prova sujeito a ensaio de líquidos penetrantes em 2; macrografia de um dos cordões da primeira camada	100
Figura 5.17 – Imagens da soldagem da mistura Stenox: a) deposição com 5,0 l/min; b) deposição com 2,5 l/min.....	101
Figura 5.18 – Soldagem em parede vertical: a) soldagem com ADP VR-F empregando 2,5 l/min; b) soldagem com ADP de Tambor empregando 5,0 l/min	102
Figura 5.19 – Revestimento produzido com ADP de Tambor: a) região revestida; b) macrografia; c) detalhe superficial do revestimento; d) superfície sujeita a ensaio de líquidos penetrantes.....	103
Figura 5.20 – Revestimento produzido com ADP VR-F: a) região revestida; b) macrografia; c) detalhe superficial do revestimento; d) superfície sujeita a ensaio de líquidos penetrantes.....	103
Figura 5.21 – Instalação dos equipamentos para aplicação do processo PTA-P na Turbina 4: a) equipamentos fora da turbina; b) percurso da extensão na entrada da turbina; c) equipamentos no interior da turbina	106
Figura 5.22 – Características de alimentação em campo: a) pó BRTS escoando no Silo; b) leito de partículas estabilizado no Fluidizador; c) jatos de pó BRTS expelidos pelo bico da tocha; d) consumível sendo lançado à poça de fusão (pá da turbina).....	108
Figura 5.23 – Depósito de Stellite 6 com 2 camadas	109
Figura 5.24 – Depósito de Inox 316L com 2 camadas.....	110
Figura 5.25 – Depósito de COG 150 com 3 camadas	111
Figura 5.26 – Depósito de Cavitec Pó com 2 camadas	111
Figura 5.27 – Depósito de pó BRTS com 1 camada.....	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Dados Técnicos do ADP de Tambor [35].....	39
Tabela 4.1 – Principais características do Motor de Passo AK57H/3G20-1,8 para ligação de bobinas em série.	66
Tabela 5.1 – Materiais selecionados para avaliação do ADP VR-F.....	81
Tabela 5.2 – Repetitividade volumétrica do ADP VR-F.....	85
Tabela 5.3. Variáveis e parâmetros adotados para a soldagem da mistura Stenox.....	98
Tabela 5.4 – Principais variáveis e parâmetros de soldagem.	102
Tabela 5.5 – Principais características das soldas produzidas.....	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOGIAS

- A_a : Área adicionada
 ADP: Alimentador De Pó
 A_f : Área fundida
 CAD: Computer Aided Design
 Cr: elemento cromo
 DC: Direct Current
Dil: Diluição dos depósitos
 d_m : diâmetro da mangueira
 d_p : diâmetro das partículas
 Fe: elemento ferro
 f_p : frequência de pulsos
hL: altura do leito de partículas
 IHM: Interface Homem-Máquina
L: largura dos depósitos
 LCD: Liquid Cristal Display
 MIG: Metal Inert Gás
 Mn: elemento manganês
 m_{po} : massa de pó
 Ni: elemento níquel
P: penetração máxima dos depósitos
 PAW: Plasma Arc Welding
 PTA-A: Plasma de arco Transferido Alimentado com Arame
 PTA-P: Plasma de arco Transferido Alimentado com Pó
 PVC: Poli Cloreto de Vinila
R: reforço dos depósitos
 R_m : resolução de passo do motor
Red: Resolução de passo do eixo da Redução
t: tempo
 T_p : período entre pulsos
txm: taxa mássica de alimentação
txV: taxa volumétrica de alimentação
U: tensão
 V_{ef} : volume efetivo de pó dosado por volta completa do Rotor
 v_g : velocidade do gás
 V_g : volume de pó dosado por grau de rotação do Rotor
 V_n : volume nominal de pó dosado por volta completa do Rotor
 v_p : velocidade da partícula
 V_{po} : volume de pó

va_g : vazão de gás

VR-F: Válvula Rotativa – Fluidizador

δ : gap

ϕL : ângulo de inclinação da superfície do leito de partículas

ρ_{ap} : densidade aparente dos pós

ρ_g : densidade do gás de fluidização

ρ_p : densidade das partículas

ω_R : velocidade angular do Rotor

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	2
1.2 OBJETIVOS E METAS	3
1.3 ESTRUTURA DO TEXTO.....	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1 O PROCESSO DE SOLDAGEM PTA-P.....	7
2.2 MATERIAIS METÁLICOS EM PÓ.....	10
2.2.1 Produção de Pós Metálicos	10
2.2.2 Características Tradicionais dos Pós Metálicos Usados no Processo PTA-P	11
2.3 ESCOABILIDADE DOS PÓS	12
2.4 ÂNGULO DE EMPILHAMENTO	16
2.5 FLUIDIZAÇÃO DE PÓS.....	17
2.6 TECNOLOGIAS PARA MANIPULAÇÃO DE PÓS.....	19
2.7 ALIMENTADORES COMERCIAIS.....	21
2.8 ACIONAMENTOS TÍPICOS EMPREGADOS NOS ADP'S ...	22
2.9 SÍNTESE DESTE CAPÍTULO	25
3 CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DOS ALIMENTADORES E DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIAS PARA SUSPENSÃO DE PARTÍCULAS	27
3.1 ADP DE FUSO.....	27
3.1.1 Desempenho em Soldagem Fora de Posição	28
3.1.2 Operação Com Pós Tradicionais e Alternativos	29
3.2 DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIAS PARA SUSPENSÃO DE PARTÍCULAS.....	31
3.2.1 Câmara de Diafragma	32
3.2.2 Câmara de Alto-Falantes	33
3.2.3 Câmara de Batente Excêntrico	34
3.2.4 Fluidizador	35
3.3 ADP DE TAMBOR.....	37
3.3.1 Desempenho em Alimentação Fora de Posição	39
3.3.2 Operação Com Pós Alternativos	40
3.4 SÍNTESE DESTE CAPÍTULO	44
4 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE PÓ PARA SOLDAGEM PTA-P	47
4.1 ASPECTOS GERAIS DO ADP VR-F	48
4.2 DESENVOLVIMENTO MECÂNICO DO ADP VR-F.....	51
4.2.1 Silo	51

4.2.2	Válvula Rotativa.....	54
4.2.3	Fluidizador	59
4.2.4	Seleção da Mangueira de Transporte Pneumático.....	62
4.3	DESENVOLVIMENTO ELETROELETRÔNICO DO ADP VR-F.....	64
4.3.1	Acionamento do ADP VR-F.....	65
4.3.2	Desenvolvimento do Gabinete de Comando	67
4.4	DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE DE COMANDO DO ADP VR-F.....	71
4.4.1	Cálculo do Período do Sinal Step em Função da Taxa de Alimentação e da Densidade Aparente	71
4.4.2	Lógica de Controle do ADP VR-F	73
4.5	SÍNTESE DESTE CAPÍTULO	77
5	AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO ADP VR-F.....	79
5.1	CARACTERÍSTICAS DE ALIMENTAÇÃO	79
5.1.1	Materiais Selecionados	79
5.1.2	Bancada e Procedimento dos Ensaios	81
5.1.3	Processamento dos Dados.....	82
5.1.4	Resultados.....	83
5.1.4.1	Repetitividade de Dosagem do ADP VR-F.....	85
5.1.4.2	Linearidade De Dosagem do ADP VR-F	86
5.2	TESTES EM SOLDAGEM.....	87
5.2.1	Bancada de Ensaios.....	88
5.2.2	Controle do ADP VR-F pela Fonte DigiPlus A7	91
5.2.3	Determinação das Características Geométricas dos Revestimentos.....	93
5.2.4	Comparação Entre ADP VR-F e ADP de Tambor na Alimentação de Pós Alternativos.....	94
5.2.5	Contribuições no Desenvolvimento da Liga Resistente à Cavitação	95
5.2.6	Deposição Sobre-Cabeça da Mistura Experimental Stenox.....	98
5.2.7	Soldagem em Parede Vertical	101
5.2.8	Soldagem PTA-P nas Turbinas Hidráulicas.....	105
5.2.8.1	Instalação dos Equipamentos	105
5.2.8.2	Resultados	107
5.3	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	112
6	CONCLUSÕES.....	115
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	117
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	119

1 INTRODUÇÃO

Percebe-se facilmente, hoje em dia, a essencial contribuição da tecnologia para a manutenção e evolução dos padrões de vida. Por consequência disto, a sociedade atual se mostra extremamente dependente da energia elétrica, visto que esta é responsável pelo acionamento de grande parte dos recursos tecnológicos disponíveis.

A necessidade crescente desta forma de energia fez com que fossem desenvolvidas diversas técnicas para a sua geração. Segundo o Atlas de Energia Elétrica do Brasil [1], a abundância de recursos hídricos no país contribui para que mais de 75% da produção de energia elétrica seja gerada por usinas hidrelétricas. Porém, a capacidade de suprimento apresenta dependência de alguns fatores, dentre eles, tecnologias que permitam a restauração periódica dos geradores danificados em serviço.

Submetidas ao fluxo intermitente de água e conseqüentes perfis complexos de pressão, as pás dos geradores das usinas hidrelétricas acabam por sofrer com a cavitação. Trata-se de um mecanismo de desgaste erosivo que age na superfície das pás a ponto de formar crateras. A erosão altera seu formato, fazendo com que o gerador perca eficiência na produção de energia. O rendimento das turbinas é restabelecido pela reconstituição das pás, tarefa em que o material metálico é repostado por intermédio da soldagem.

Visando qualidade na aplicação de ligas de alta resistência à cavitação no reparo de suas turbinas, a empresa de geração de energia elétrica TRACTEBEL ENERGIA S.A. e o LABSOLDA desenvolveram em parceria, de acordo com Silva e Dutra [2], a modalidade de soldagem MIG Pulsado com Pulsção Térmica (patente nº PI 0004698-1) para deposição da liga resistente à cavitação CAVITEC®. O êxito alcançado impulsionou a TRACTEBEL a investir em pesquisa e desenvolvimento de uma nova tecnologia em busca de melhorias operacionais, assim como o desenvolvimento de uma nova liga resistente à cavitação.

Então, o LABSOLDA propôs desta vez, o emprego do processo de soldagem Plasma de Arco Transferido Alimentado com pó (PTA-P). Este processo já vinha sendo investigado no LABSOLDA no contexto de inovações no equipamento e tem sido utilizado por pesquisadores como Menon e Mosier [3], no desenvolvimento de ligas metálicas experimentais, obtidas ao se fundir simultaneamente (na poça de fusão) misturas pré-formuladas, compostas por elementos metálicos em pó. Além disto, o aumento da eficiência na deposição de material e a

redução do tempo gasto nas atividades de reparo podem ser promovidos pelo PTA-P. Devido a suas características processuais, é possível reduzir o número de passes para obtenção da composição química desejada na superfície e quantidade de material removido em retrabalho, pois menores níveis de diluição e melhor acabamento superficial podem ser obtidos (Ragu e Webber [4]; Aircraft Plasma [5]).

1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Segundo Silva [6], as aplicações industriais e as pesquisas científicas abordadas na literatura relatam atividades de soldagem PTA-P na posição plana em sua absoluta maioria. Por outro lado, o reparo das turbinas hidráulicas exige a realização de soldas em posições forçadas, devido à inviabilidade de posicioná-las, por se tratarem de componentes de geometria complexa e de grandes dimensões.

Quanto aos consumíveis em pó utilizados tradicionalmente no processo PTA-P, estes possuem características específicas e normatizadas, obtidas por um processo de fabricação direcionado. No entanto, o desenvolvimento de ligas por PTA-P envolve, normalmente, matéria-prima alternativa obtida por processos de fabricação genéricos, cujas propriedades morfológicas e granulométricas não condizem com as tradicionalmente empregadas.

Por estas razões, além dos desafios metalúrgicos e processuais esperados, uma preocupação imediata recai sobre os equipamentos de alimentação de pó, com relação a seu desempenho na alimentação de soldas fora de posição e no processamento dos materiais alternativos.

Um alimentador de pó, ou ADP é, geralmente, composto por um mecanismo que transfere partículas de pó de um reservatório para uma mangueira, onde flui um gás que as arrasta. Sua função é enviar o consumível à tocha de soldagem de forma contínua e dosada. Os ADP's disponíveis comercialmente, cuja característica de portabilidade permite seu transporte e instalação nas turbinas, possuem propriedades operacionais limitadas à aplicação do PTA-P na posição plana e são projetados para o processamento de consumíveis específicos para este processo.

Comumente, são instalados a aproximadamente 1,5 m acima do nível da tocha (da solda) e as mangueiras de transporte pneumático devem estar dispostas na posição vertical, evitando voltas ou curvas. Estas limitações caracterizam o auxílio da gravidade ao transporte do

consumível, o que possibilita a moderação da vazão de gás de transporte. Tal fato é relevante, pois, de acordo com Díaz [7], podem ser obtidos depósitos com defeitos utilizando níveis de vazão maiores que os tradicionais. Porém, a soldagem PTA-P fora de posição exige o envio de pó contra a gravidade.

Silva [6] enfrentou grande dificuldade em se encontrar ligas especiais em pó e fornecedores nacionais de pós para PTA-P. Além disto, características físico-químicas dos materiais particulados para diferentes aplicações e fatores econômicos determinam a escolha de diferentes métodos de fracionamento, introduzindo no comércio, pós de diversas características morfológicas e granulométricas, como relatado por Díaz [8]. Estes fatores submetem o desenvolvimento de ligas ao uso destes materiais alternativos, os quais podem apresentar propriedades de escoamento impróprias para os ADP's disponíveis, comprometendo seu desempenho na alimentação e dificultando o desenvolvimento das ligas, como acontecido com Ribeiro [9].

A vazão do consumível em termos mássicos é uma informação importante na soldagem PTA-P, pois a influência exercida pela alimentação de pó sobre o referido processo é dependente da massa de material adicionado. A unidade mais utilizada para expressar a vazão mássica é kg/h. Entretanto, os equipamentos conhecidos, utilizados por Silva, Díaz e Ribeiro [6, 8 e 9], não disponibilizam interfaces para a regulação da vazão mássica desejada. Tal dado só é conhecido pela medição da massa dispensada pelo ADP (com uma balança) em um determinado intervalo de tempo. Esta operação é normalmente efetuada durante as atividades de soldagem, o que prejudica tanto sua própria execução como a realização das soldas.

1.2 OBJETIVOS E METAS

De acordo com os problemas anteriormente relatados, a aplicação do processo PTA-P em caráter industrial na recuperação dos geradores hidráulicos e o desenvolvimento da liga resistente à cavitação carecem de um sistema de alimentação especial. A disponibilização deste ADP consiste no objetivo geral deste trabalho. Para tanto, devem ser realizadas as seguintes metas:

- Desenvolver um dispositivo que realize o transporte dos consumíveis em oposição à gravidade empregando vazões de

gás de arraste compatíveis com os níveis normais. Este dispositivo deverá fornecer robustez e eficiência necessárias ao processo PTA-P em sua aplicação nas turbinas hidráulicas;

- Elaborar e construir um mecanismo capaz de manipular pós tradicionais e alternativos com dosagem fixa. Tais propriedades permitirão que o ADP contribua no desenvolvimento de novos materiais e viabilize a adoção de um sistema de controle que permita a regulagem da taxa de alimentação em termos mássicos;
- Selecionar e integrar os elementos de comando (atuadores, placas de acionamento e de controle) mais adequados ao sistema desenvolvido. Com isto, deve-se também elaborar um *software* dotado de funções que viabilizem o controle do alimentador a partir da taxa mássica desejada.

E, por fim, para avaliação do sistema desenvolvido:

- Caracterizar seu comportamento na dosagem de pós tradicionais e alternativos por meio da realização de ensaios de linearidade e repetitividade. Os resultados destes testes determinarão se o sistema é capaz de permitir a regulagem da taxa mássica de forma compatível para diferentes materiais;
- Envolvê-lo nas atividades de desenvolvimento de misturas experimentais empreendidas no LABSOLDA. O objetivo disto consiste em avaliar as contribuições do sistema na produção de depósitos de qualidade utilizando material alternativo;
- Empregá-lo em soldagem fora de posição submetendo o transporte de consumíveis a baixas vazões de gás de arraste;
- Utilizá-lo em atividades de campo. O equipamento deve fazer parte dos equipamentos envolvidos para a aplicação de materiais experimentais nas turbinas hidráulicas por PTA-P.

1.3 ESTRUTURA DO TEXTO

Com o intuito de alcançar os objetivos supracitados, a estrutura do presente trabalho está subdividida em sete capítulos, sendo esta introdução o Capítulo 1.

O Capítulo 2 expõe a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento do sistema de alimentação. Nela estão expressos conceitos fundamentais para o entendimento do conteúdo além de serem abordadas as tecnologias do processo PTA-P, de transporte e manipulação de pós e acionamento de mecanismos. Também são apresentados alguns tipos de alimentadores disponíveis comercialmente.

O Capítulo 3 apresenta estudos realizados com alimentadores disponíveis no LABSOLDA antes de ser iniciado o desenvolvimento do novo ADP. Destes equipamentos foram caracterizadas as propriedades de alimentação e transporte de consumíveis, além da capacidade destes em manipular materiais alternativos e tradicionais. Ainda neste capítulo são apresentadas algumas tentativas de desenvolvimento de um dispositivo para preparar os materiais para transporte e enviá-los contra a gravidade com baixas vazões de gás de arraste.

O Capítulo 4 apresenta o projeto completo do novo alimentador, levando em consideração as informações científicas (abordadas no Capítulo 3) a cerca das limitações dos ADP's convencionais na manipulação, dosagem e transporte de consumíveis. Descreve o desenvolvimento mecânico e eletroeletrônico, além do *software* de controle elaborado. Os dispositivos mecânicos, de acionamento e cálculos realizados pelo software são descritos com detalhes.

O Capítulo 5 aborda os testes realizados com o equipamento e seus resultados. As experiências visam avaliação do ADP no desempenho de dosagem e em atividades de soldagem, as quais incluem sua contribuição no desenvolvimento de ligas e na aplicação do processo PTA-P em campo.

O Capítulo 6 explana as conclusões que puderam ser consideradas, de acordo com os testes realizados para a avaliação do alimentador.

Por fim, o Capítulo 7 propõe alguns estudos que se tornam possíveis com o emprego do equipamento desenvolvido.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A concepção do novo sistema de alimentação de pó para a soldagem PTA-P envolveu temas da literatura que nortearam seu desenvolvimento. Tais abordagens serão comentadas neste capítulo.

2.1 O PROCESSO DE SOLDAGEM PTA-P

O processo PTA-P consiste em uma modalidade de soldagem apropriada à produção de revestimentos. A sigla PTA abrevia seu nome em inglês: *Plasma Transferred Arc*. Para diferenciação, uma vez que tal processo pode ser alimentado com arame ou com pó, foram sugeridas por Díaz [8] as nomenclaturas PTA-A e PTA-P, respectivamente. O termo Plasma em sua denominação refere-se à atuação física do arco em consequência de detalhes construtivos da tocha de soldagem. A Figura 2.1 esquematiza o processo PTA-P, relacionando a tecnologia da tocha com os equipamentos básicos envolvidos no processo.

Na tocha, o eletrodo de tungstênio (não consumível) encontra-se confinado em uma câmara metálica refrigerada à água chamada bico constritor. Um orifício situado no centro da base do bico constritor restringe as dimensões do arco de soldagem (arco transferido), concentrando a energia na coluna plasma.

O confinamento do eletrodo exige um meio para a abertura do arco, o que é realizado com a ajuda de um arco auxiliar, chamado arco piloto. Para obtê-lo, é utilizada uma fonte de energia adicional (fonte de corrente) conectada ao eletrodo (negativo) e ao bico constritor (positivo). A fonte do arco piloto possui um ignitor que produz pulsos de alta tensão e, ao atuar, vence o dielétrico entre os componentes citados e ioniza uma porção do gás que flui entre os referidos elementos, estabelecendo uma via eletrocondutora e, assim, o arco piloto se mantém ativo.

O gás plasma que atravessa o arco piloto é constantemente ionizado e seu fluxo segue em direção à peça (ao sair pelo orifício constritor). Esta coluna de gás ionizado estabelecida entre o eletrodo e o substrato se comporta como um condutor elétrico gasoso. Assim, quando é imposta a diferença de potencial elétrica da fonte principal de soldagem o arco plasma se estabelece entre seus pólos, ou seja, entre o eletrodo (negativo) e a peça (positivo).

A tocha de soldagem PTA-P possui um bocal que envolve o bico constritor. Entre estes dois componentes flui o gás de proteção (normalmente argônio) que expurga o ar atmosférico da região da solda. A tocha PTA-P apresenta um bico constritor mais espesso, em relação à tocha PAW, já que, no interior de suas paredes, passam os canais de injeção de pó, cujas saídas distribuem-se por volta do orifício constritor. Nesta via, as partículas são transportadas pneumaticamente a partir do do ADP, onde o gás e o pó são inseridos. Os jatos de pó se interceptam dentro do arco, onde as partículas são fundidas e formam os cordões de solda.

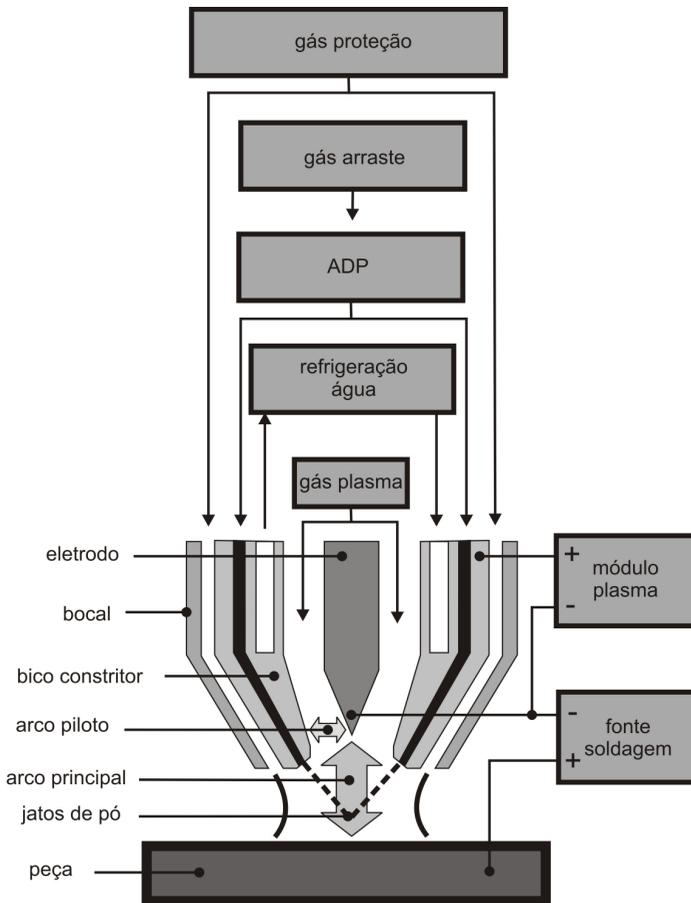


Figura 2.1 – Esquema de uma tocha PTA-P genérica em corte associando sua tecnologia aos principais elementos envolvidos no processo

O rendimento de deposição é, conforme relata Diaz [7], significativamente influenciado pela vazão de gás de arraste. Quando transportadas com altas vazões de gás, muitas partículas atravessam a coluna do arco plasma sem sofrer desvio. Tal fato promove o lançamento de fragmentos para fora da poça de fusão, gerando desperdício de material. Uma relação operacional entre a taxa de alimentação e a vazão de gás de arraste é sugerida por Deuis [10], ilustrada no gráfico da Figura 2.2. Fora da qual, surgem mordeduras ou alimentação deficiente de pó.

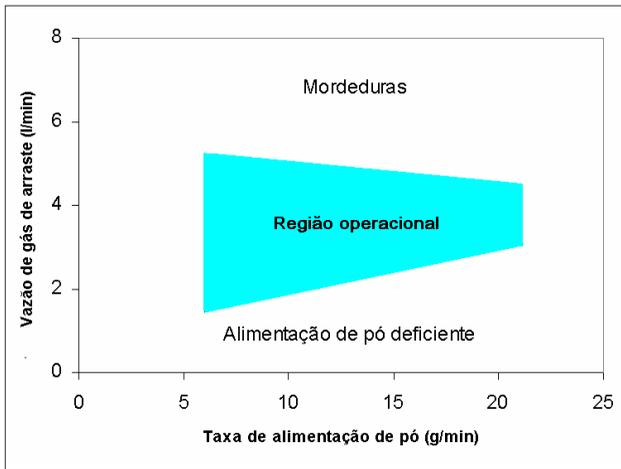


Figura 2.2 – Relação entre taxa de alimentação de pó e vazão de gás de arraste utilizadas no processo PTA-P, Deuis [10]

Foram realizados por Diaz [7] ensaios com dois níveis de vazão de gás de arraste (2 e 6 l/min) na deposição de uma liga à base de cobalto. Em tal trabalho o autor constatou que, para a maior vazão, o cordão apresentou falta de penetração em suas laterais. Já Huang [11] relata que o fluxo de gás de arraste se apresenta turbulento em altas vazões, promovendo a entrada de ar no arco plasma e na atmosfera de soldagem. Depósitos com porosidade e oxidados resultam dessas condições de alimentação.

Nota-se, portanto, a necessidade em manter a vazão de gás dentro dos limites determinados, ou seja, em torno de 2 l/min não sendo aconselhável o aumento deste valor no intuito de se soldar fora da posição plana. Ao invés disto, deve-se atuar no projeto do transporte pneumático.

2.2 MATERIAIS METÁLICOS EM PÓ

Serão relatados, a seguir, os principais aspectos pertinentes aos pós metálicos tradicionais e alternativos cujas características são passíveis de serem empregadas no PTA-P.

2.2.1 Produção de Pós Metálicos

Os pós metálicos normalmente utilizados na obtenção de ligas via PTA-P são obtidos por atomização ou trituração. A Figura 2.3 esquematiza estes métodos de produção de pós. Existem outros processos de produção de pós metálicos, porém, com menor expressão no mercado.

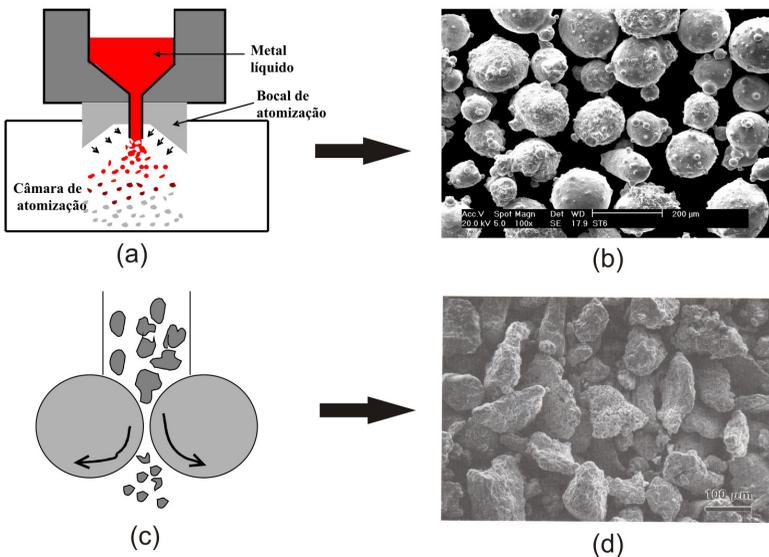


Figura 2.3 – Processos de fabricação de pós utilizados no processo PTA-P, Klein [13]: a) processo de atomização; b) pó atomizado; c) processo de trituração; d) pó triturado

A atomização, esquematizada na Figura 2.3 (a) é o processo mais utilizado para produzir pós metálicos para aplicações gerais (ASM

Handbook [12]). Consiste em expandir um fluxo de metal líquido por meio da injeção de gás (ar atmosférico ou gás especial), água ou óleo sob pressão. Este processo pode produzir partículas com o formato aproximadamente esférico, como mostrado na Figura 2.3 (b).

O tritramento (ou moagem), representado pela Figura 2.3 (c), é o processo mais econômico e mais indicado para, segundo ASM Handbook [12], se produzir pós de metais duros e frágeis. Este método emprega rolos, martelos, mandíbulas ou bolas para triturar os metais a partir de blocos sólidos. Os fragmentos produzidos por este método, como ilustra a Figura 2.3 (d), são angulares e não possuem forma definida, apresentando geralmente superfície escarpada.

2.2.2 Características Tradicionais dos Pós Metálicos Usados no Processo PTA-P

Os materiais tradicionais, utilizados no processo PTA-P, possuem forma esférica (ou semi-esférica) e faixa de distribuição granulométrica normatizada. A padronização se dá, segundo Marconi [14], por meio do peneiramento de 100 g de pó em peneiras de diferentes aberturas de malha, sendo separado em várias porções de diferentes faixas granulométricas. Estas porções são distribuídas em torno de um valor médio, como mostra o exemplo da Figura 2.4.

Na literatura são encontradas diferentes faixas granulométricas aconselhadas para a soldagem de ligas ferrosas por PTA-P. Os diâmetros de partículas recomendadas variam de 45 μm (mínimo) a 250 μm (máximo), valores estes estabelecidos por questões metalúrgicas (pois partículas pequenas demais superaquecem e partículas muito grandes não se fundem totalmente) ou operacionais (os sistemas de alimentação apresentam dificuldades em manipular materiais muito finos ou constituídos por grãos muito grosseiros).

É sugerido por Xibao e Hua [15] que a seleção da faixa de distribuição granulométrica das partículas dependa dos parâmetros de soldagem e do material a ser utilizado, devido ao comportamento térmico de cada pó.

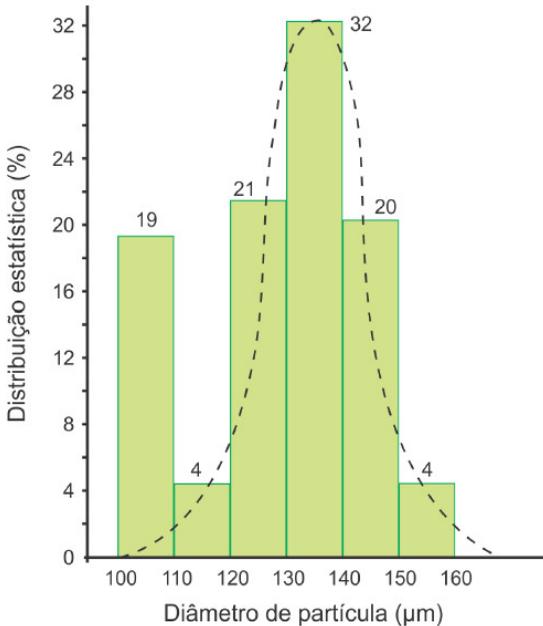


Figura 2.4 – Histograma de faixa granulométrica de um material entre 100 e 160 μm , Marconi [14]

2.3 ESCOABILIDADE DOS PÓS

Escoabilidade é uma expressão referente à capacidade de fluir que um pó apresenta. Tal fenômeno não pode ser expresso como um valor único ou um índice. De acordo com Prescott e Barnum [16], é resultante não só da combinação das propriedades físicas e químicas do material que afetam o seu escoamento, mas também do equipamento usado para manipular, armazenar ou processar o material.

Conforme reporta Schulze [17], quando um silo é descarregado, dois padrões distintos de escoamento podem ocorrer: o escoamento em massa e o escoamento em funil. A Figura 2.5 ilustra tais padrões. No escoamento em massa, todas as partículas contidas no silo se movem durante a descarga. No caso do escoamento em funil, somente uma porção do pó do silo desce durante a descarga enquanto o resto permanece estático, formando zonas de estagnação.

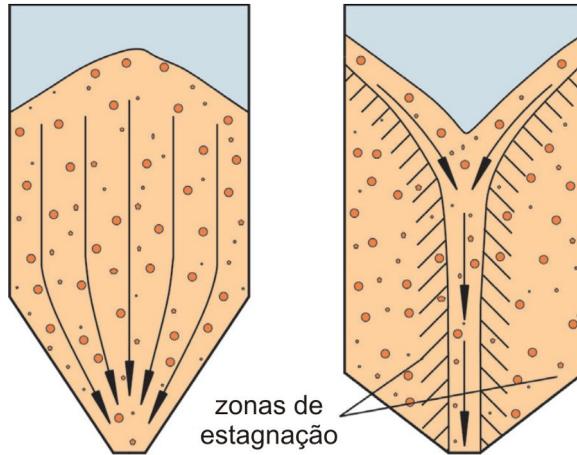


Figura 2.5 – Padrões de escoamento de pós em silos, Schulze [17]. Escoamento em massa (esquerda) e escoamento em funil (direita)

As principais características que determinam o padrão de escoamento dos pós (em um silo com determinado ângulo de afunilamento da base e determinado diâmetro do canal de descarga) são, segundo Marinelli e Carlson [18], as propriedades de fricção e a densidade aparente do material.

O movimento das partículas em escoamento promove a fricção, por sua vez, composta por dois fenômenos: a fricção interna e a externa. A fricção interna é causada pelo contato dinâmico entre as partículas presentes no fluxo de pó. A fricção externa é originada pelo movimento dos fragmentos que fluem em contato com as paredes do reservatório (ASM Handbook [12]).

Ambos os coeficientes podem ser determinados a partir de procedimentos normatizados, empregando aparatos especiais, esquematizados na Figura 2.6. Tais equipamentos consistem basicamente em um aro. Nele, uma quantidade de pó é inserida e coberta por uma tampa, sobre a qual são aplicadas forças variadas no sentido normal. No caso da medição da fricção externa (Figura 2.6 (a)), outra força é aplicada no sentido ortogonal à força normal da tampa, fazendo com que o aro deslize sobre uma superfície constituída pelo material do silo (chapa). O mesmo procedimento é realizado para a medição da fricção interna, porém o aro é bipartido (Figura 2.6 (b)). Assim, a força ortogonal é exercida na parte de cima do aro, tendendo a provocar o cisalhamento do material. Os coeficientes são calculados relacionando a

força normal com a força necessária para arrastar o material sobre a chapa (no caso da medição da fricção externa) ou provocar o cisalhamento (no caso da medição da fricção interna).

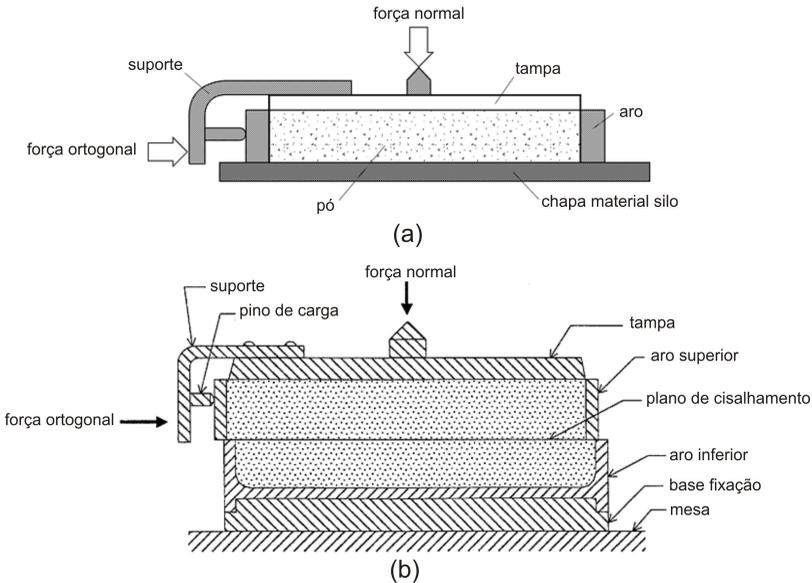
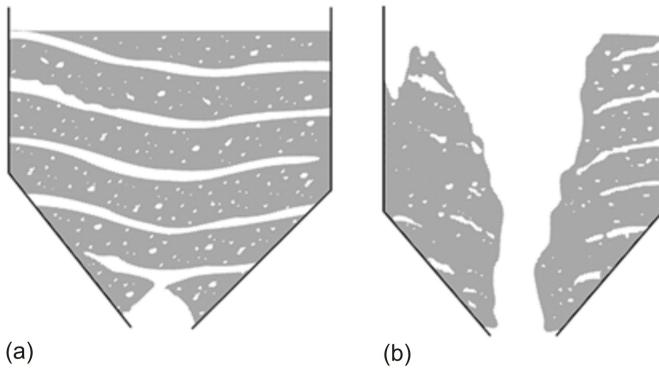


Figura 2.6 – Medição dos coeficientes de fricção, ASM Handbook [12]: a) aparato para determinação de fricção externa; b) aparato para determinação de fricção interna

O fenômeno de fricção interna dos pós é afetado, principalmente, pelas propriedades de forma, tamanho e regularidade superficial das partículas (ASM Handbook [12]). Tais características determinam a coesividade do material, ou seja, a capacidade dos fragmentos em aderir um ao outro e permanecerem juntos quando expostos a agentes que promovam tais interações. De acordo com Prescott e Barnum [16], os principais agentes que concedem coesividade aos pós são umidade, pressão, propriedades químicas e elétricas, sendo que, no caso da pressão, pode ser promovida pelo próprio peso do material quando armazenado em um silo ou pelo mecanismo que o manipula. Devido à coesividade entre as partículas, um arco ou um caminho de rato podem se formar durante a descarga de um silo. Estes defeitos de escoamento são representados na Figura 2.7.



Um arco (também chamado de ponte ou cúpula) é uma obstrução estável que se forma no ponto acima do canal de descarga, suportando todo peso do conteúdo do reservatório e evitando o escoamento do pó. Já o defeito de caminho de rato é um canal ou cavidade vertical criada pelo esvaziamento da coluna superior ao canal de descarga do reservatório. O material se deixa compactar em zonas de estagnação e permanece estático até que uma força externa provoque uma avalanche (ASM Handbook [12]).

A densidade aparente é uma das propriedades fundamentais dos materiais granulados. É definida de acordo com um procedimento normatizado descrito no Capítulo 5 deste trabalho, pois houve a necessidade de determiná-la para cada material empregado. Representa o volume ocupado por uma massa de pó não compactado. Os principais fatores que afetam a densidade aparente, segundo o ASM Handbook [12], são:

- **Composição Química:** a densidade aparente depende principalmente da densidade resultante da combinação dos elementos que constituem o material.
- **Morfologia das Partículas:** quando o formato das partículas se torna menos esférico há tendência ao aumento do espaço vazio entre elas e, com isso, a densidade aparente é reduzida. Neste

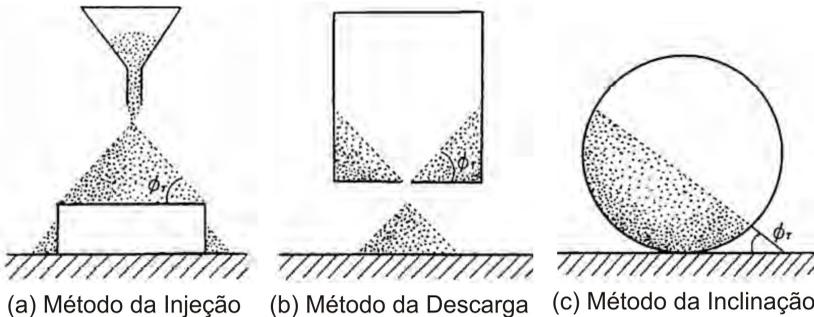
caso, a área de fricção dos fragmentos também aumenta, contribuindo para a redução da escoabilidade.

- Faixa Granulométrica: O aumento da densidade aparente, na maioria dos casos, melhora a escoabilidade do pó. Um meio efetivo para aumentar a densidade aparente de um pó é preencher os espaços vazios entre os grãos com partículas menores, o que significa aumentar a faixa de distribuição granulométrica do material.

2.4 ÂNGULO DE EMPILHAMENTO

O ângulo de empilhamento é definido pelo ângulo formado entre o plano horizontal e a superfície livre de uma pilha de pó, resultante da organização das partículas frente à ação da gravidade. Ele reflete a inclinação necessária para que um funil propicie o escoamento de um material.

Os principais fatores que influenciam no ângulo de empilhamento são, segundo informações contidas no Powder Technology Handbook [19], a faixa granulométrica, a rugosidade da superfície das partículas e os espaços vazios entre elas. Esta literatura diz também que há três métodos padronizados para se determinar o ângulo de empilhamento: o método de injeção, o da descarga e o da inclinação. Tais procedimentos são ilustrados pela Figura 2.8.



(a) Método da Injeção (b) Método da Descarga (c) Método da Inclinação

Figura 2.8 – Métodos para determinação do ângulo de empilhamento, Powder Technology Handbook [19]

2.5 FLUIDIZAÇÃO DE PÓS

A fluidização é o processo em que um leito de partículas sólidas é induzido a se comportar como um líquido, podendo ser deformado ou fluir com as partículas relativamente livres para se mover entre si. De acordo com a descrição de Gibilaro [20], isto é conseguido ao se fazer um fluido atravessar verticalmente o leito, com velocidade capaz de produzir uma força ascendente igual ou superior ao peso dos fragmentos que o compõe, mantendo-os em suspensão. Esta tecnologia é largamente empregada nas indústrias química, farmacêutica e agrícola, em processos físicos e químicos como secagem de partículas, recobrimento de sólidos, reatores catalíticos, transporte de grãos, etc.

Em função da velocidade com que o gás é injetado há, basicamente, três tipos de leitos: fixo, móvel e expandido. Os dois últimos são classificados como leitos fluidizados.

Segundo Chase [21], se o gás for insuflado com velocidade inferior à mínima velocidade de fluidização (termo que designa a velocidade necessária para compensar o peso das partículas), há o estabelecimento de um leito fixo. Por outro lado, se o gás for injetado com velocidade igual ou superior à velocidade terminal (termo que designa a velocidade máxima com a qual um leito pode se operado com suas partículas suspensas em uma posição estável) os fragmentos não encontram uma posição de equilíbrio, tendendo a se manter em movimento até deixarem o recipiente, caracterizando um leito móvel. Entretanto, se submetido a um fluxo de gás com velocidade igual à mínima velocidade de fluidização e menor que a velocidade terminal, as partículas tendem a permanecer suspensas manter distância umas das outras, formando um leito expandido.

De acordo com a construção do recipiente, consegue-se estabelecer leitos com características híbridas. Como exemplo pode ser citado o leito de jorro. Ilustrado na Figura 2.9, é empregado neste trabalho, conforme será apresentado no Capítulo 4.

De acordo com a descrição de Marreto [23], um leito de jorro é tipicamente constituído por uma câmara cilíndrica conectada a uma base cônica. Possui no centro de sua base um orifício de dimensões reduzidas, através do qual o fluido de jorro é injetado no sistema. Após a entrada do fluido observa-se a aceleração ascendente das partículas sólidas e a formação de um canal central diluído, onde as mesmas apresentam elevada velocidade.

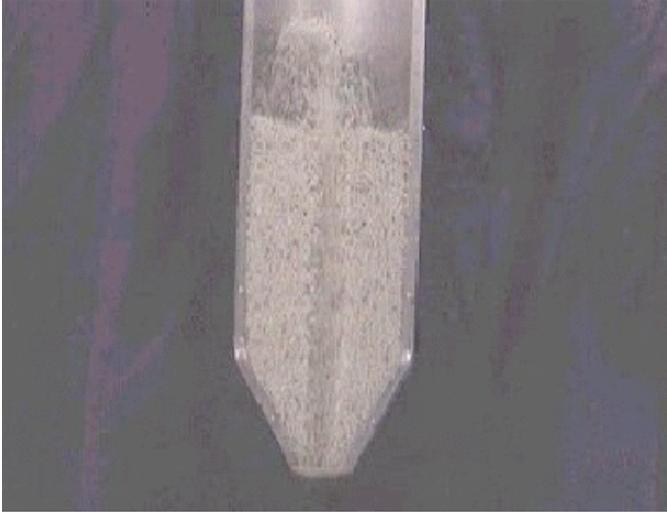


Figura 2.9 – Leito de jorro de arroz, www.ufrnet.br [22]

Segundo Lacerda, Carvalho e Ataíde [24], um leito fluidizado pode ser operado em seis regimes diferentes: fluidização homogênea, fluidização borbulhante, fluidização do tipo slug, fluidização turbulenta, fluidização rápida e transporte pneumático. Este último é o regime de fluidização empregado para o transporte de partículas do ADP para a poça de fusão. A Figura 2.10 esquematiza os regimes de fluidização, relacionando-os com a velocidade do gás.

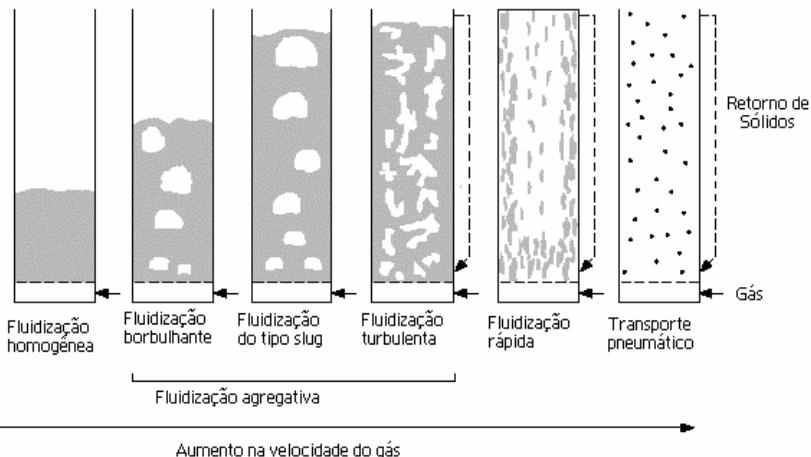


Figura 2.10 – Regimes de fluidização, Lacerda, Carvalho e Ataíde [24]

Conforme relata Dechsiri [25], a fluidização de um pó depende, principalmente, do diâmetro das partículas (d_p), de sua densidade (ρ_p) e da densidade do gás de fluidização (ρ_g). Em função destas grandezas, o autor informa que Geldart classifica os pós em quatro grupos distintos, como mostra o gráfico da Figura 2.11 (disponível no Handbook of Fluidization [26]). Os materiais mais fáceis de serem fluidizados são aqueles que se compreendem no tipo A, chamados aeráveis. Os pós da classe B (tipo areia) também apresentam boas qualidades para fluidização. O grupo C é representado por pós compostos por partículas coesivas, fator que compromete a sua fluidização (e também sua escoabilidade). No grupo D estão os pós chamados ejetores, pois o gás de fluidização atravessa o leito sem mover as partículas ou ejeta o material para fora do recipiente.

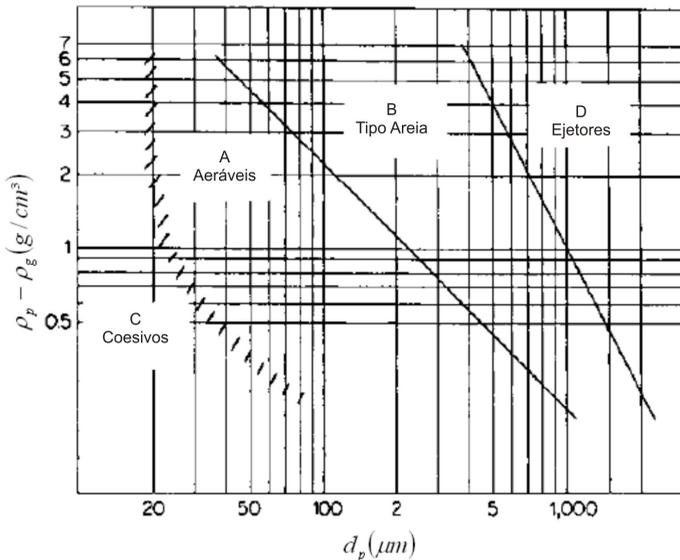


Figura 2.11 – Gráfico de classificação de partículas de Geldart, Handbook of Fluidization [26]

2.6 TECNOLOGIAS PARA MANIPULAÇÃO DE PÓS

Diversos mecanismos para alimentação e deslocamento de materiais granulados atendem as atividades industriais. Os mais

utilizados são os alimentadores de Fuso, de Esteira, Válvula Rotativa e os tipo Venturi. A Figura 2.12 apresenta os sistemas comentados.

Os alimentadores de Fuso, na Figura 2.12 (a), baseiam-se em um parafuso sem-fim acoplado a um atuador (motor). São capazes de deslocar horizontalmente o material do silo que cai entre os filetes, transferindo-o do reservatório para o destino desejado.

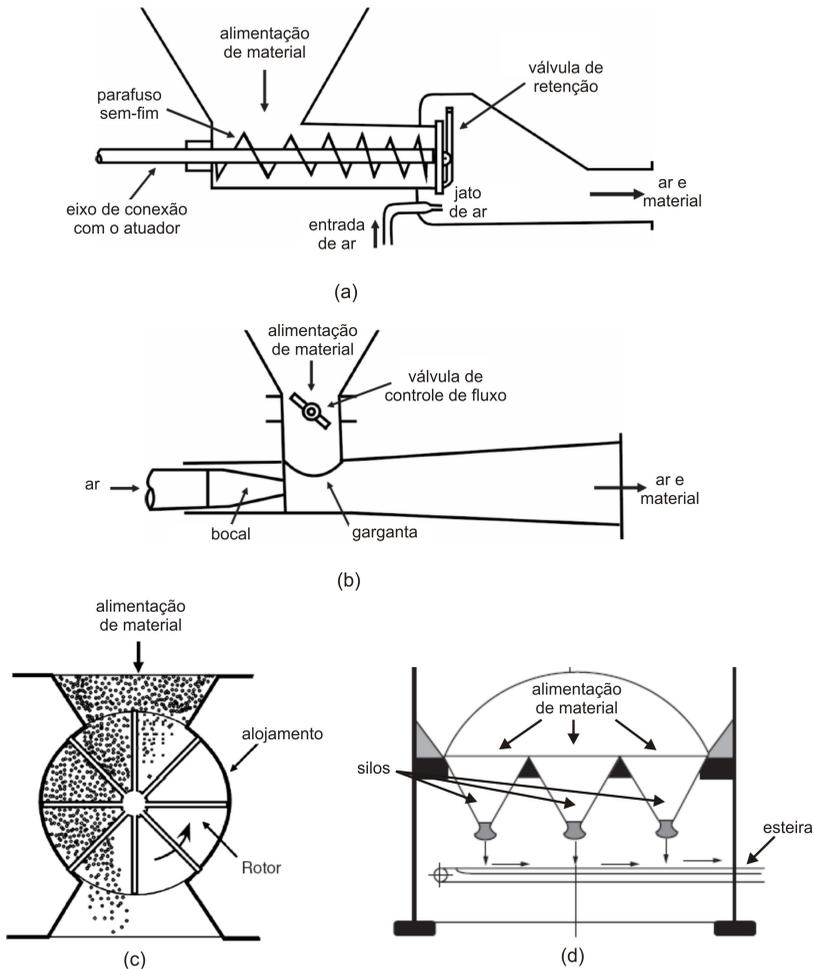


Figura 2.12 – Mecanismos de alimentação de materiais granulados, McGlinchey [27]: a) alimentador de fuso; b) alimentador tipo Venturi; c) válvula rotativa; d) alimentador de esteira

A Figura 2.12 (b) esquematiza os alimentadores tipo Venturi. Consistem em uma redução na seção transversal da mangueira de gás (bocal) na região em que o material é alimentado. O gás, em alta velocidade, transfere grande quantidade de energia cinética para os fragmentos. Segundo McGlinchey [27], este mecanismo não fornece controle de fluxo preciso, necessitando de outro elemento adicional para esta tarefa.

A Válvula Rotativa, na Figura 2.12 (c), consiste em um rotor com cavidades. Acionado por um atuador, este gira encerrado em um alojamento. O material alimentado cai por gravidade e invade as cavidades do rotor. McGlinchey [27] também afirma que as válvulas rotativas são capazes de fornecer o controle de fluxo volumétrico de materiais granulados, de acordo com a velocidade do rotor.

Os alimentadores de Esteira (Figura 2.12 (d)) são formados por uma esteira que rola sobre polias localizadas nas suas extremidades e é suportada por rolos. Normalmente é posicionada abaixo de silos de armazenamento que, por sua vez apresenta um canal de queda geralmente retangular.

2.7 ALIMENTADORES COMERCIAIS

Dentre as tecnologias de processamento de materiais granulados apresentadas, as mais utilizadas pelos fabricantes de alimentadores dedicados ao processo PTA-P são os de Fuso e os de Esteira e suas variações. Na verdade, a esteira, nos ADP's é substituída por um tambor, para simplificar a fabricação e reduzir suas dimensões. Alimentadores de alguns fabricantes internacionais são apresentados na Figura 2.13.

Na Figura 2.13 (a), é apresentado o ADP fabricado pela empresa Plasma Team [28]. As características disponibilizadas pelo fabricante apontam a capacidade do reservatório como sendo 1,5 l, a faixa de vazão mássica entre 0 e 5 kg/h e a faixa granulométrica das partículas de +63-150 μm .

A Figura 2.13 (b) ilustra o ADP da Alloys International PGL-10 [29], cujo fabricante garante qualidade no desempenho de ligas em pó à base de cobalto, níquel e ferro, compostas por partículas de faixa granulométrica entre +35-212 μm . Também relata que o fuso é acionado

por um motor DC, e a taxa mássica pode ser regulada pela variação da velocidade do motor em níveis correspondentes entre 1 a 8 kg/h.

O ADP da Figura 2.13 (c) é fabricado pela empresa Eutectic Castolin [30], que disponibiliza poucas informações sobre o equipamento. Diz apenas que a taxa de alimentação é regulada pela variação da rotação do tambor, de acordo com programação disponível na fonte de soldagem.

Na Figura 2.13 (d), é apresentado o ADP de Tambor modelo PM-10 da empresa Plasma Master. Tal alimentador foi adquirido pelo LABSOLDA, com o intuito de estudar as viabilidades de sua aplicação no desenvolvimento da liga e na soldagem PTA-P fora de posição. Suas características são apresentadas no próximo capítulo deste trabalho.

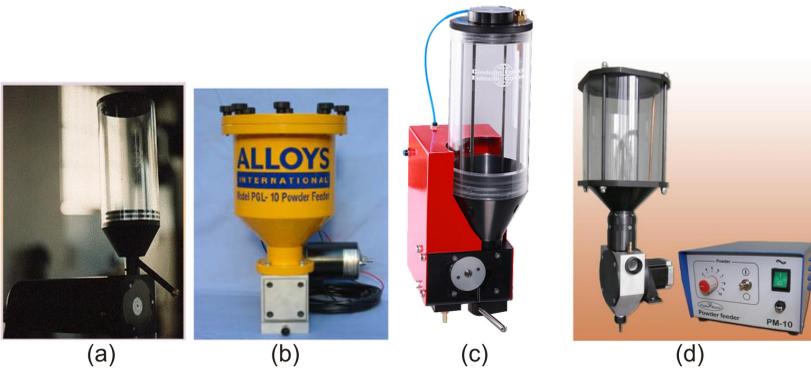


Figura 2.13 – Alimentadores de pó comerciais para PTA-P: a) ADP de Fuso Plasma Team; b) ADP de Fuso Alloys International; c) ADP de Tambor Eutectic Castolin; d) ADP de Tambor Plasma Master

2.8 ACIONAMENTOS TÍPICOS EMPREGADOS NOS ADP'S

Embora possa haver exceções (equipamentos desconhecidos), os atuadores geralmente empregados nos ADP's são os Motores de Passo e os Motores DC com Escovas. Para ambos os atuadores podem ser adotadas duas tecnologias de acionamento, sendo estas o acionamento em Malha Aberta e em Malha Fechada. Tais tecnologias são esquematizadas pela Figura 2.14.

O acionamento da carga em Malha Aberta, mostrado na Figura 2.14 (a), é realizado quando um controlador envia sinais de comando a uma placa de acionamento, ou *driver*. Este, por sua vez, manipula a

energia elétrica, dosando a alimentação do motor de acordo com os sinais recebidos. Conforme é energizado, o motor gira seu eixo, movimentando a carga. No entanto, neste método de acionamento, quando é solicitado o deslocamento da carga a determinada velocidade, não há garantias que o comando será executado com sucesso.

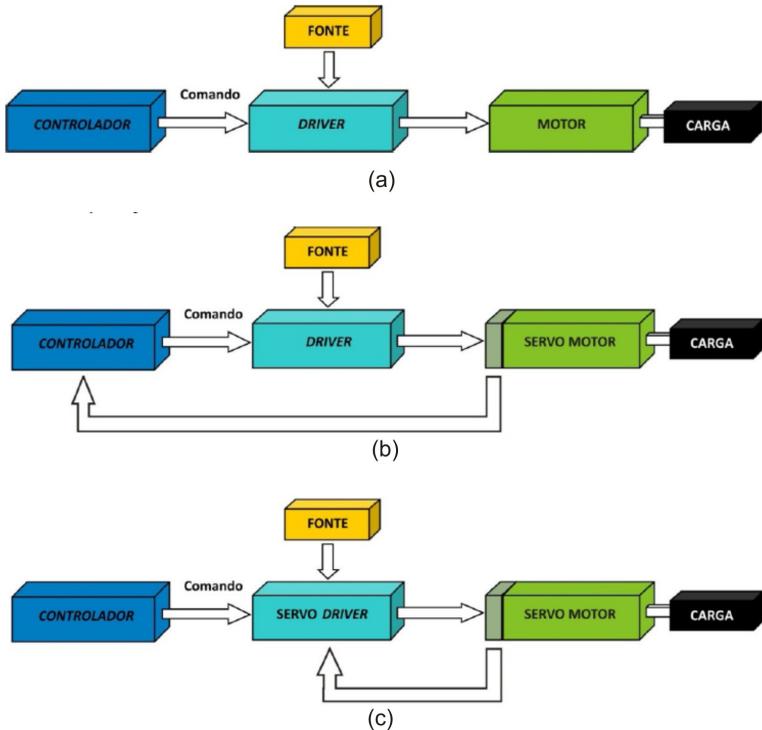


Figura 2.14 – Métodos de acionamento de motores, Carvalho [31]: a) acionamento em Malha Aberta; b) acionamento em Malha Fechada com servo motor; c) acionamento em malha fechada com servo motor e servo driver

No acionamento em Malha Fechada, a corrente fornecida ao motor é dosada por um sistema eletrônico de controle capaz de atuar contra forças externas que se opõem ao movimento. Este método propicia maior confiabilidade na execução das trajetórias.

O acionamento em Malha Fechada pode ser realizado em duas configurações. Em uma delas, a malha de controle é fechada por meio do controlador, que recebe sinais provenientes de um transdutor de movimento presente em um servo motor (*encoder*), conforme a

configuração ilustrada na Figura 2.14 (b). O *driver*, por sua vez, somente dosa a energia ao servo motor de acordo com os sinais do controlador. Em outra configuração, esquematizada na Figura 2.14 (c), os sinais do transdutor do servo motor são enviados diretamente a um servo *driver*, responsável pelo fechamento da malha de velocidade e posição. Neste método, os sinais do controlador servem apenas como referência.

Nos métodos de acionamento abordados, os sinais de comando emitidos pelo controlador ao *driver*, transmitem informações sobre o movimento requerido. Nos métodos de acionamento em malha aberta os sinais tipicamente usados são dois. Um deles dita a velocidade ou posição do motor, chamado *Step*. O outro, chamado *Dir*, informa o sentido de rotação determinado pelo controlador. O aspecto destes sinais elétricos é esquematizado na Figura 2.15.

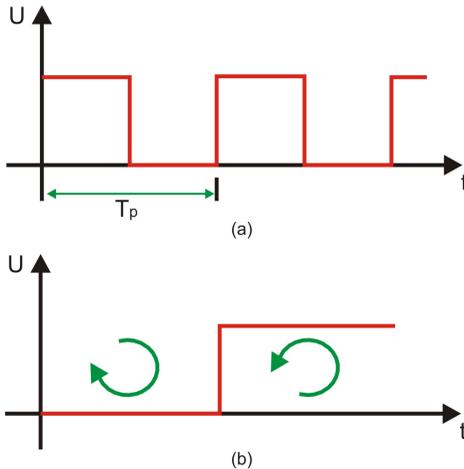


Figura 2.15 – Sinais de comando tipicamente empregados: a) sinal *Step*; b) sinal *Dir*

Na Figura 2.15 (a) pode-se notar que a onda formada em vermelho possui pulsos periódicos de tensão (U). Cada pulso corresponde a um passo do motor. Determinando o período entre os pulsos (T_p) o sinal *Step* assume uma frequência, estabelecendo a velocidade de rotação desejada no motor, pois este ganha aspecto de uma onda quadrada desenvolvendo-se ao longo do tempo (t). O sinal *Step* também pode representar a posição do eixo do motor, já que cada pulso representa um deslocamento angular conhecido.

Conforme ilustra a Figura 2.15 (b), o sentido de rotação é determinado de acordo com o nível elétrico do sinal *Dir*. Se em baixo ($U=0$), o motor assume um sentido de rotação. Se em alto, o motor gira no sentido oposto.

2.9 SÍNTESE DESTE CAPÍTULO

Na fundamentação teórica apresentada viu-se a importância relatada pela literatura no emprego de vazões de gás de arraste em torno de 2,0 l/min. Seu aumento demasiado em relação a este valor potencializa a ocorrência de problemas nas soldas produzidas.

Os consumíveis tradicionalmente empregados no processo PTA-P possuem características morfológicas e granulométricas padronizadas, apresentando propriedades adequadas de fusão no arco de soldagem e de escoamento dentro dos alimentadores.

Entretanto, como os materiais alternativos não se adéquam às normas, a forma e distribuição dimensional de suas partículas modificam os padrões de escoamento, podendo proporcionar entupimentos e estagnação do material no interior dos alimentadores.

Para evitar os defeitos de escoamento, a base de um reservatório pode ser projetada de acordo com o procedimento do ângulo de empilhamento dos pós, que reflete o ângulo necessário para que um pó escoe em um funil.

Os alimentadores convencionais empregam a tecnologia de fluidização em regime de transporte pneumático para transferir o pó de seu reservatório até a tocha de soldagem. No entanto, existem dispositivos para estabilizar o material em forma de leito de partículas antes de submetê-los ao transporte, como o leito de jorro.

Embora sejam encontradas diversas tecnologias para alimentação de materiais em pó, os alimentadores comerciais são, em sua maioria, constituídos pelo princípio do fuso ou das esteiras transportadoras. Tais equipamentos, acionados por motores DC (malha fechada) ou motores de passo (malha aberta), não são equipados com dispositivos formadores de leitos de partículas.

3 CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DOS ALIMENTADORES E DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIAS PARA SUSPENSÃO DE PARTÍCULAS

Dois alimentadores foram estudados. Um deles consiste em um ADP de Fuso, concebido por Díaz [8] em sua tese de doutorado e desenvolvido no próprio laboratório. O outro é um ADP de Tambor, equipamento comercial adquirido pelo laboratório. Os resultados obtidos serão utilizados para orientar o desenvolvimento de um ADP capaz de permitir a obtenção de ligas e a aplicação do processo PTA-P fora de posição.

3.1 ADP DE FUSO

Os primeiros estudos realizados com o processo PTA-P no LABSOLDA dispuseram de uma bancada de ensaios à qual estava integrado o ADP de Fuso, instalado a aproximadamente 1,5 m acima do nível da tocha. Este alimentador, mostrado na Figura 3.1, é constituído basicamente por um reservatório de pó, um parafuso sem-fim (acionado por um motor de passo) e uma linha de gás de transporte constituída de Cristal de PVC, de diâmetro interno de 3,5 mm.

Na Figura 3.1 (a), a Etapa 1 descreve a queda do pó metálico proveniente do reservatório sobre o sem-fim, realizada por gravidade através de um canal central na base do silo. A Etapa 2 ilustra a transferência das partículas de pó pelo parafuso (quando em rotação) até os canais de caída. Na Etapa 3 as partículas de pó escoam pelos canais de caída, sendo despejadas na linha de gás de transporte. Uma vez atingidos pelo fluxo de gás, os fragmentos são transportados pneumaticamente até a tocha de soldagem, evento esquematizado na Etapa 4.

A regulagem da taxa mássica de alimentação é realizada por meio do controle da rotação do sem-fim, possibilitado pelos equipamentos apresentados na Figura 3.2. Dentro do gabinete, mostrado na Figura 3.2 (a), há uma placa de controle e um *driver* para acionamento do motor de passo e, a ela, é conectada uma interface homem-máquina (IHM). Na verdade, o sistema não permite a regulagem direta da taxa de alimentação de pó, apenas a rotação do parafuso, variável de entrada na IHM, como exposto na Figura 3.2 (b). O relacionamento entre a taxa de

alimentação e a rotação é realizado por meio do levantamento de curvas de calibração de calibração.

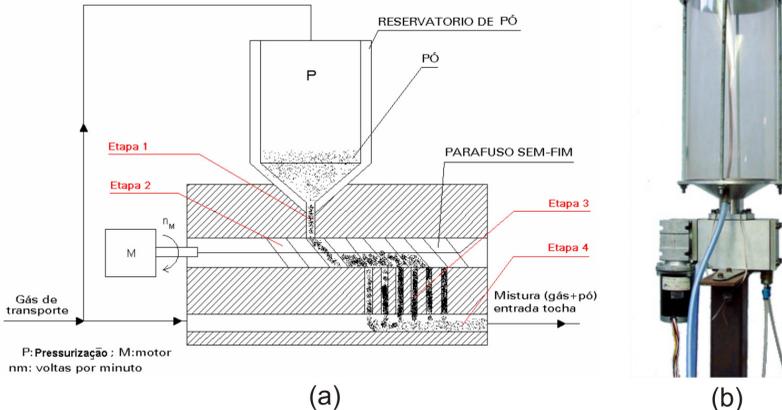


Figura 3.1 – ADP de Fuso [8]: a) esquema de funcionamento; b) Alimentador fabricado



Figura 3.2 – Controle do ADP de Fuso: a) gabinete e IHM; b) opção de controle de rotação do fuso na IHM

3.1.1 Desempenho em Soldagem Fora de Posição

Com o ADP de Fuso, Diaz [7,8] realizou experiências que culminaram na deposição da liga Stellite 6 (para PTA-P) na posição sobre-cabeça. Alguns dos cordões foram produzidos com vazões de gás de arraste de 2,0 l/min. O autor não comenta sobre qualquer problema

em relação à alimentação contrária à gravidade com este nível de vazão. Porém, por alguma razão, experimentou a realização de soldas com vazões maiores (4 e 6 l/min). Como consequência disto, obteve depósitos com falta de penetração nas regiões laterais dos cordões.

Posteriormente foi observado que uma vazão de 2,0 l/min não concede robustez ao envio de consumíveis na posição sobre-cabeça, como mostrado na Figura 3.3. Tal situação exige, como apresentado na Figura 3.3 (a), que a tocha de soldagem seja posicionada com o bico voltado para cima, provocando uma curva na linha de transporte em formato de “U” vertical. A Figura 3.3 (b) mostra que, nesta condição, as partículas são arremessadas a curtas distâncias e há acúmulo de pó dentro da mangueira, fato que acarreta em perturbações na alimentação.

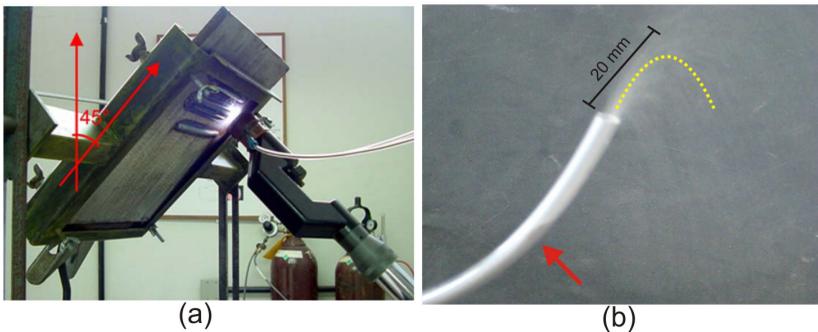


Figura 3.3 – Transporte contra a gravidade: a) posicionamento da tocha para soldagem na posição sobre-cabeça [8]; b) pequeno jato de partículas e seta indicando precipitação de pó dentro da mangueira de transporte pneumático

3.1.2 Operação Com Pós Tradicionais e Alternativos

Em busca de uma liga metálica resistente à cavitação, Ribeiro [9] experimentou misturas que envolveram pós triturados e utilizou este ADP. Alguns cordões estão expostos na Figura 3.4. Depósitos com baixas taxas de alimentação foram severamente influenciados por uma alimentação deficiente (cíclica e perturbada), considerada pelo autor como prejudicial à sua pesquisa. A Figura 3.4 (a) apresenta um cordão no qual a influência da má qualidade da alimentação produziu um efeito semelhante ao de uma corrente pulsada na superfície do cordão. O item (b) da mesma figura mostra a tentativa de produção de um cordão com maior taxa de alimentação de pó. Mesmo assim, o efeito da alimentação

perturbada ainda se pronuncia (vista superior). Tais fatos indicam desempenho deficiente na alimentação de materiais alternativos e, dessa forma, o equipamento não fornece condições favoráveis ao desenvolvimento da liga.

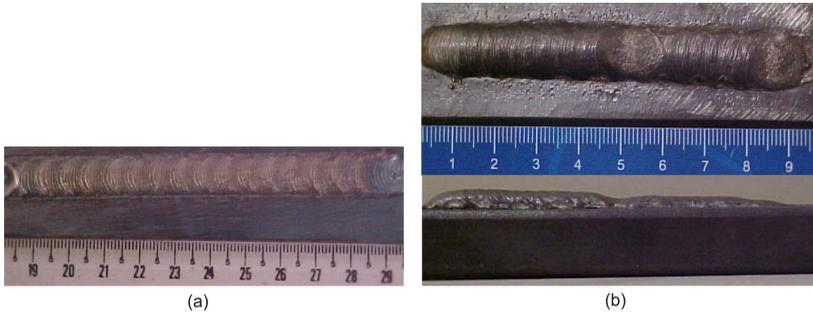


Figura 3.4 – Depósitos produzidos com o emprego do ADP de Fuso [9]: a) cordão confeccionado com 0,26 kg/h; b) cordão produzido com 0,48 kg/h

Mesmo utilizando um pó tradicional, de composição básica Fe-Cr-Mn, com faixa granulométrica +53 -180 μm , notou-se que a alimentação ocorria de forma oscilatória e perturbada. Tal comportamento da alimentação e suas consequências são ilustrados pela Figura 3.5, cujo item (a) mostra a dispensa oscilatória de pó pelo sem-fim. Este fenômeno, que aleatoriamente se pronuncia com maior ou menor intensidade, causa os defeitos mostrados na Figura 3.5 (b). Neste revestimento (de duas camadas), pode-se notar a acentuação dos efeitos do referido fenômeno em determinadas regiões. Tal fato ocorre devido à coincidência de pulsos de alimentação ao longo dos cordões, inibindo o potencial do processo PTA-P na realização de revestimentos com bom acabamento superficial.

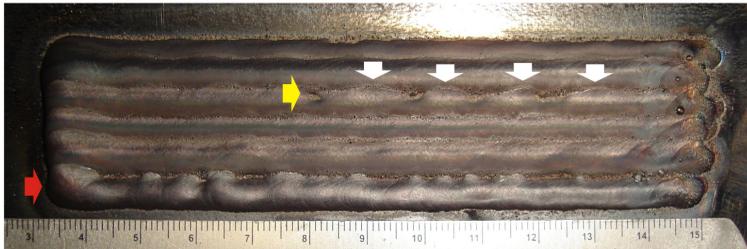
De acordo com estudos Owen e Cleary [32], simulando o comportamento de partículas esféricas, ovais e cúbicas durante o transporte em um parafuso horizontal, há formação de doses de material entre os filetes, como se pode observar na Figura 3.6. Dessa forma, a alimentação cíclica de pó é considerada uma tendência característica na alimentação por parafuso.

Devido a dificuldades em repetir resultados de soldagem, foi realizado um estudo mais detalhado sobre as características de alimentação do ADP de Fuso [33]. Nos ensaios foi detectada influência considerável da quantidade de material armazenada no silo sobre a dosagem fornecida pelo parafuso. Foram também observadas variações

(em níveis preocupantes) da taxa de alimentação no decorrer do seu monitoramento. Tais fatos inviabilizam a calibração deste equipamento e dificultam a reprodução das soldas.

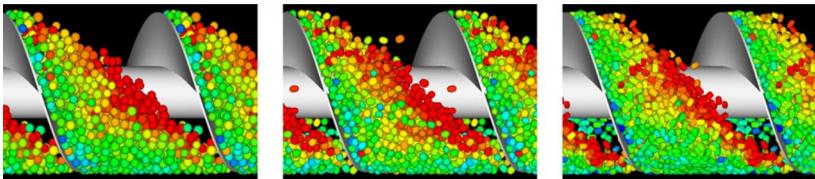


(a)



(b)

Figura 3.5 – Características de alimentação do ADP de Fuso: a) dispensa de pó pelo parafuso (intervalos de 1,6 s) indicada pelas setas amarelas; b) defeitos causados pelas irregularidades de alimentação: Setas brancas indicam influência das perturbações, a amarela indica um vazio criado por este defeito e a vermelha, um cordão defeituoso



(a)

(b)

(c)

Figura 3.6 – Simulação do comportamento de pós transportados por parafuso [32]: a) para partículas esféricas; b) ovais; c) cúbicas;

3.2 DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIAS PARA SUSPENSÃO DE PARTÍCULAS

Sendo este ADP o único disponível no LABSOLDA, julgou-se necessário empreender tentativas para, ao menos, atenuar as oscilações de sua alimentação. Assim, foi resolvido adicionar um novo componente

entre o parafuso e o transporte pneumático. Tal mecanismo deveria exercer a função de melhorar as condições de transporte, na tentativa de se obter revestimentos de qualidade.

3.2.1 Câmara de Diafragma

A primeira solução adotada foi vibrar o pó proveniente do parafuso por meio da ação de um mecanismo baseado em um diafragma de borracha. O objetivo era estabelecer uma nuvem de pó dentro de uma câmara, dispersando as partículas agrupadas pelas condições de dosagem e, com isso, atenuar as perturbações. Detalhes sobre este sistema podem ser conferidos na Figura 3.7.

Consiste em uma câmara dividida ao meio por uma membrana (diafragma). Na câmara superior, as partículas caem sobre esta e são atingidas pela corrente de gás de arraste. Na câmara inferior era inserido ar comprimido, liberado intermitentemente por uma válvula de alívio com uma frequência capaz de provocar a vibração do diafragma.

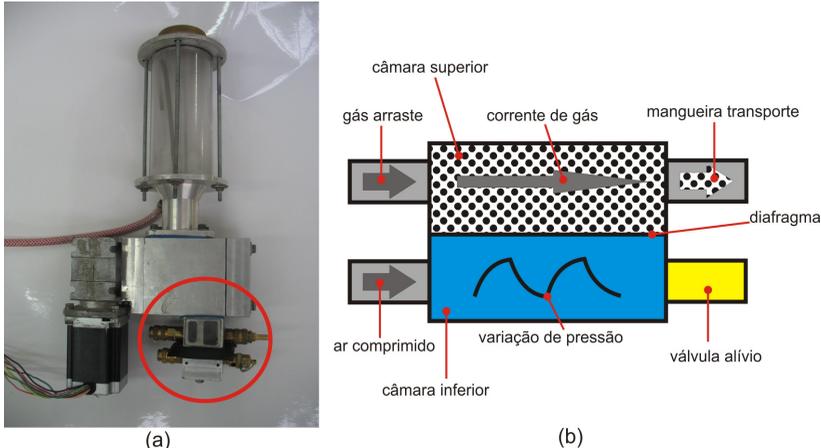


Figura 3.7 – ADP de Fuso: a) Sistema com a Câmara de Diafragma acoplada (sinalizado com um círculo); b) desenho esquemático da Câmara de Diafragma

Este sistema não permitiu a formação da nuvem de pó. As partículas não eram suspensas o suficiente para atingir a corrente de gás de arraste. Isto fazia com que a quantidade de pó aumentasse dentro da câmara superior e amortecesse cada vez mais a vibração do diafragma.

Ao fim, toda a câmara superior era preenchida com partículas, sem haver fluxo de pó na linha de transporte.

3.2.2 Câmara de Alto-Falantes

Em busca de outra forma para suspender as partículas, foi elaborado um recipiente cuja base e cobertura eram alto-falantes, conectados a um tubo de PVC, chamado Câmara de Suspensão. A Figura 3.8 mostra detalhes do aparato experimental juntamente com seu sistema de acionamento elétrico e circuito pneumático.

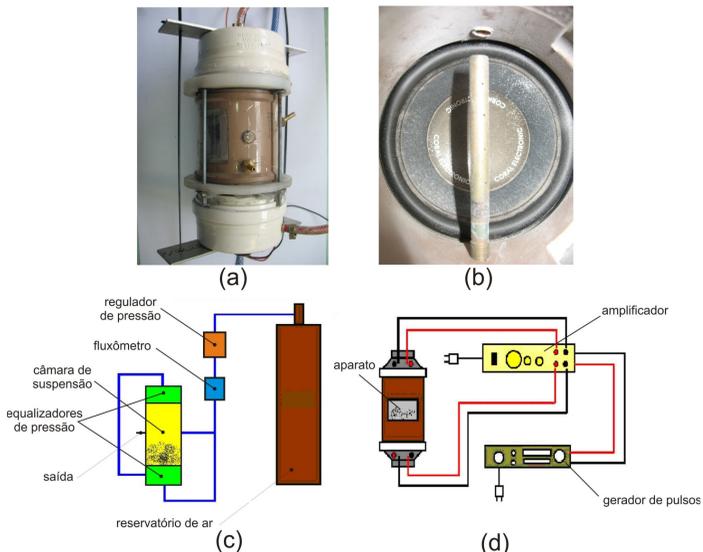


Figura 3.8 – Câmara de Vibração por Alto-Falantes: a) foto do aparato; b) vista superior interna da câmara; c) circuito pneumático; d) circuito elétrico

Nele, uma quantidade de pó era depositada sobre a membrana do alto-falante da base e sujeita à sua vibração. Rente à base, na direção horizontal, era inserido o gás de arraste por uma peça cilíndrica oca com pequenos orifícios laterais. Horizontalmente alinhado ao canal de entrada de gás foi instalado o conector de saída, para onde as partículas deveriam escoar com o fluxo de arraste. Os alto-falantes eram acionados por sinais elétricos emitidos por um amplificador e criados, por sua vez, em um gerador de pulsos.

O sistema foi capaz apenas de formar a nuvem de partículas, porém, não efetuou a dispensa do pó para a mangueira de transporte pneumático, sendo abandonado. O aumento da quantidade de partículas sobre a membrana do alto-falante tendia a reduzir a amplitude de vibração, diminuindo a capacidade de suspensão.

3.2.3 Câmara de Batente Excêntrico

Um sistema menos sensível à variação da quantidade de pó depositado em sua base (em comparação à Câmara de Alto-Falantes) foi experimentado. A Figura 3.9 apresenta detalhes da Câmara de Batente Excêntrico e ilustra seu funcionamento mecânico. Nele, o movimento vibratório acontece por meio da interação entre o movimento do batente excêntrico acoplado a uma furadeira, com o mecanismo de uma bomba de gasolina usada em automóveis. O batente entra em contato com uma peça da bomba que funciona como um pistão. A extremidade superior do pistão era conectada a uma membrana de borracha que forma a base do reservatório, agitando o leito de partículas.

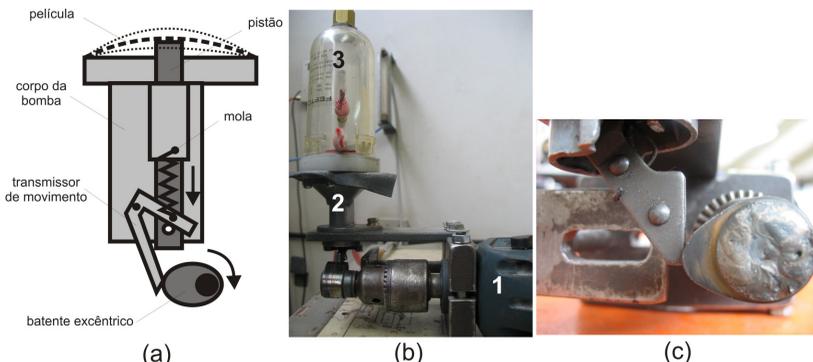


Figura 3.9 – Câmara de Batente excêntrico: a) desenho esquemático; b) vista frontal com furadeira (1), bomba de gasolina (2) e reservatório (3); c) detalhe do contato entre o batente e o transmissor de movimento

Na prática, houve a suspensão de partículas dentro do reservatório. Também houve a dispensa de pó para o transporte pneumático, mas, na saída da mangueira, observava-se o jato de pó ainda mais pulsado do que a alimentação resultante do parafuso. Tal fato reprovou este mecanismo.

3.2.4 Fluidizador

Ainda visando formar uma nuvem homogênea de partículas dentro de uma câmara antes de sujeitá-las ao transporte pneumático, foi fabricado um aparato chamado Fluidizador. A Figura 3.10 ilustra o esquema de funcionamento do Fluidizador e o protótipo construído.

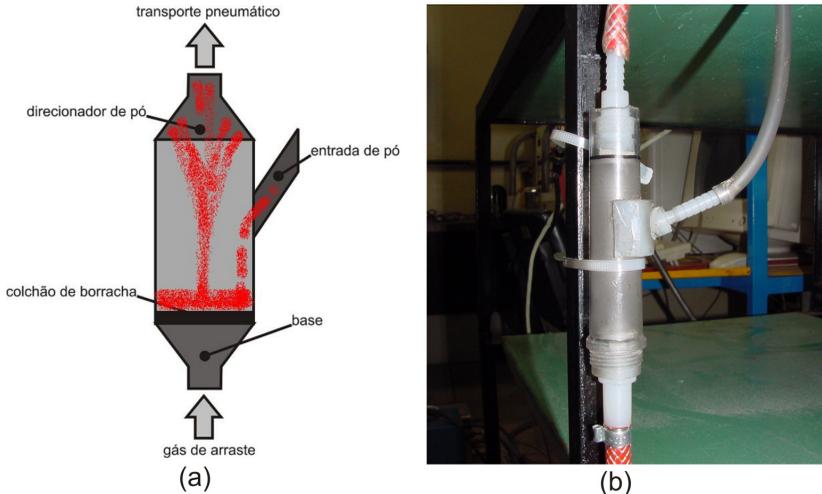


Figura 3.10 – Fluidizador: a) esquema de funcionamento; b) protótipo fabricado

Era constituído por um tubo cuja base apresentava uma conexão para entrada de gás de arraste e era coberta por um colchão de borracha com um minúsculo orifício central. Sua cobertura era composta por uma peça cônica (direcionador de pó) com um encaixe para a linha de transporte pneumático. No meio do tubo havia uma entrada para o pó proveniente do ADP.

A presença do gás de arraste (atravessando o orifício do colchão de borracha) deve atingir a região central do leito de material acomodado na base e provocar um jorro de partículas. Os fragmentos arremessados contra o direcionador de pó devem ser induzidos a entrar na mangueira de transporte, fluindo para a tocha de soldagem.

Sem a necessidade de atuadores elétricos, o Fluidizador conseguiu promover o transporte de partículas atenuando de forma considerável as oscilações da alimentação resultante do parafuso do ADP. Foi possível, como mostrado na Figura 3.11, realizar operações de soldagem com o ADP instalado no mesmo nível da tocha, sem

preocupações com o posicionamento das mangueiras e com vazão de gás de arraste de 2,0 l/min.

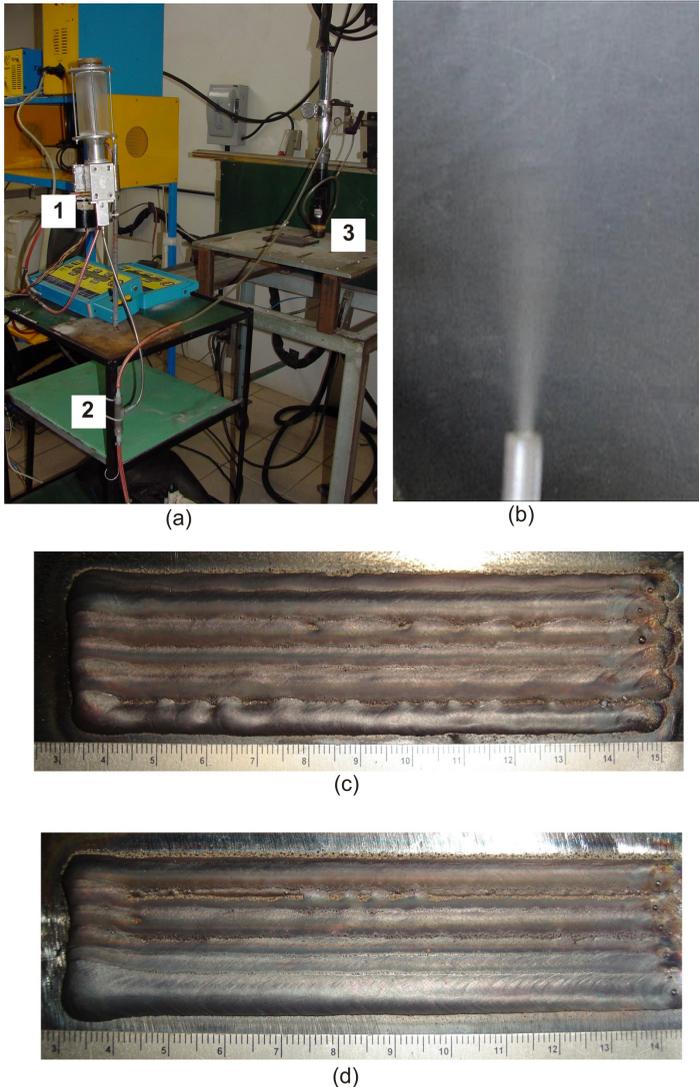


Figura 3.11 – Soldagem envolvendo o Fluidizador: a) bancada de ensaios com 1- ADP de Fuso, 2- Fluidizador e 3- Tocha de Soldagem; b) aspecto do jato de partículas expelido pela mangueira de 2,0 mm; c) aspecto de um revestimento produzido sem Fluidizador; d) aspecto de um revestimento produzido com Fluidizador

Além disto, foi possível utilizar a mangueira de 2,0 mm para taxas de alimentação de até 2,0 kg/h (acima deste valor, a alimentação perde a qualidade) e realizar o transporte de partículas com vazões de gás de 2,0 l/min, estando o ADP situado ao mesmo nível da tocha. Assim sendo, o Fluidizador exerceu duas funções: atenuar as perturbações provenientes do mecanismo de alimentação e possibilitar a soldagem PTA-P fora de posição, mantendo a vazão de gás de arraste dentro dos níveis normais.

Na Figura 3.11 é apresentado o posicionamento do ADP e do Fluidizador na bancada, o aspecto do jato de partículas e o revestimento produzido. Nesta figura pode-se constatar também que a superfície do revestimento realizado com o Fluidizador é mais regular, devido à atenuação das perturbações cíclicas da alimentação do parafuso por parte do Fluidizador.

3.3 ADP DE TAMBOR

Em virtude dos problemas concernentes à alimentação de pó por parte do ADP de Fuso, foi adquirido pelo LABSOLDA um alimentador disponível comercialmente cujo princípio mecânico se baseia nas esteiras transportadoras. Neste equipamento, a esteira dá lugar a um tambor rotativo, porém com a mesma função. A Figura 3.12 apresenta o ADP com seu gabinete de controle e mostra sua estrutura mecânica em corte frontal.

Basicamente consiste em um sistema onde o pó armazenado em seu reservatório é condicionado a depositar-se por gravidade sobre o Tambor através do Tubo de Queda. Como sua extremidade conserva certa distância (δ) do Tambor, chamada *gap*, uma coluna de material se forma entre eles, sendo deslocada e se restabelecendo continuamente conforme a rotação do tambor. Com o gás de arraste inserido no ADP, o transporte pneumático é realizado pelo vazamento deste através da mangueira de saída juntamente com o pó lançado na linha.

A taxa de alimentação pode ser regulada por meio dos dispositivos ilustrados na Figura 3.13. Em seu gabinete, exibido na Figura 3.13 (a), além de uma chave de habilitação, há um potenciômetro que permite a regulação da rotação do tambor. Porém a escala associada a este não apresenta unidade, apenas níveis de velocidade.

Este alimentador também permite a regulagem do *gap* baseando-se em um mecanismo (semelhante ao de um micrômetro) mostrado na Figura 3.13 (b). Nele, um nônio radial (porca) desloca uma escala vertical (parafuso) e, com ela, o Tubo de Queda. Se maior, aumenta a massa de pó dispensada, se menor, reduz a vazão mássica para a mesma rotação.

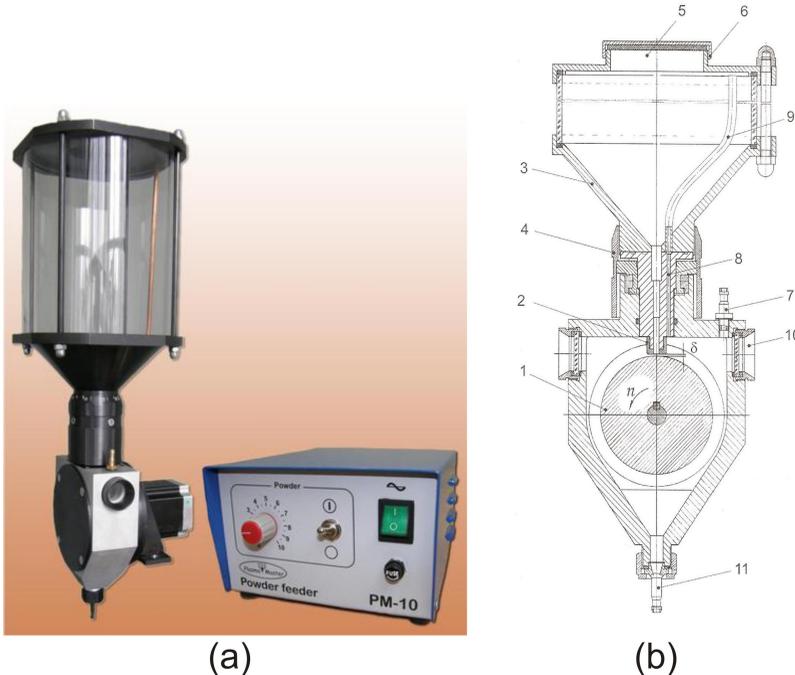


Figura 3.12 – ADP de Tambor: a) produto comercial e seu gabinete de controle [34]; b) estrutura em corte frontal. Principais itens: 1- Tambor; 2- Tubo de Queda; 3- Base do Silo; 4- Nônio; 7- entrada de gás; 8- conexão gasosa Silo-Tambor; 10- Visor; 11- conexão com linha pneumática [35]

A Tabela 3.1 é fornecida no manual do equipamento [35]. As informações nela contidas esclarecem que este alimentador é próprio para atender as aplicações convencionais da soldagem PTA-P, uma vez que recomenda seu uso no processamento de consumíveis tradicionais (quanto à morfologia e granulometria). No manual há também a informação que este alimentador deve ser instalado a uma altura de 1,5 a 1,8 m acima da tocha.

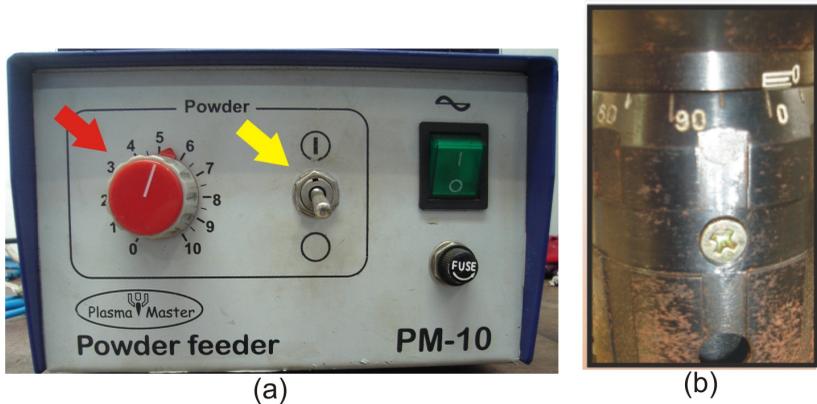


Figura 3.13 – Opções de regulação da taxa de alimentação: a) potenciômetro (seta vermelha) e chave de habilitação (seta amarela); b) escala e nônio para regulação do gap

Tabela 3.1 – Dados Técnicos do ADP de Tambor [35].

Características	Especificações
Tensão Alimentação	220 V, 50 – 60 Hz
Faixa de Vazão de Pó	0 ... 10 kg/h
Capacidade do Reservatório	3,5 l
Faixa Granulométrica	56 – 250 μm
Forma das Partículas de Pó	Esférica
Modo de Operação	Contínuo
Peso	8 kg

3.3.1 Desempenho em Alimentação Fora de Posição

Tentativas empreendidas com o objetivo de realizar soldas na posição sobre-cabeça, nas condições apresentadas na Figura 3.14 (a) (inclusas em um relatório [36]), exigiram altas vazões de gás de arraste (entre 4,5 e 5,0 l/min). Vazões inferiores a estas (3,0 l/min) favorecem o acúmulo de pó dentro da mangueira, fenômeno mostrado na Figura 3.14 (b), causando fortes perturbações no jato de partículas.

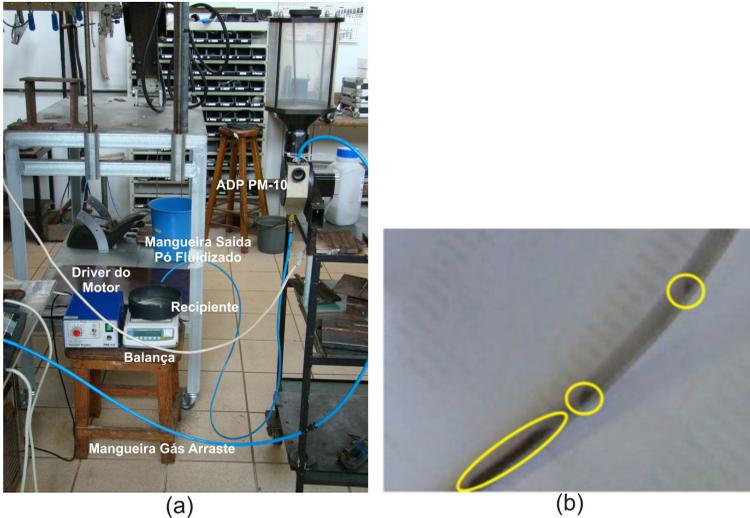


Figura 3.14 – Testes submetendo o ADP de Tambor ao transporte contra a gravidade, relatório LABSOLDA [36]: a) bancada de ensaios; b) Precipitação do pó na linha de transporte pneumático

Tentando solucionar o problema, foi utilizada uma mangueira mais delgada para dar mais velocidade ao pó com vazões de gás adequadas. No entanto, o jato de partículas apresentou-se perturbado, mesmo em baixas taxas de alimentação. Acredita-se que a redução do diâmetro de entrada de pó na linha de transporte (para 2,0 mm) dificulte o escoamento do material para dentro da mangueira, prejudicando o transporte pneumático.

Assim, as condições de soldagem fora de posição fornecidas pelo ADP de Tambor não são favoráveis a bons resultados, pois altas vazões de gás de arraste podem trazer os problemas previstos na literatura ou aqueles obtidos por Díaz [8] com o ADP de Fuso.

3.3.2 Operação Com Pós Alternativos

A Figura 3.15 apresenta o comportamento de escoamento de pós alternativos no interior do ADP de Tambor.

Na manipulação de pós triturados foi observada tendência a entupimentos frequentes (formação de arco). Se forçado a manipular tais materiais (por meio de vibrações provocadas com as mãos), era formado

caminho de rato, como mostrado na Figura 3.15 (a). Tais fenômenos, reportados no relatório [36] caracterizam péssimo desempenho deste ADP na manipulação destes materiais.

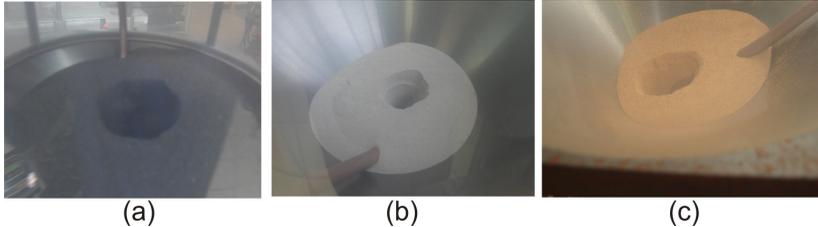


Figura 3.15 – Defeito de escoamento de caminho de rato, relatório LABSOLDA [36]: a) Pó Fe-Ni Triturado; b) Inox 316L (+45-90 μm); c) Bronze (+40-200 μm)

Já na operação com materiais atomizados alternativos, Figura 3.15 (b) e (c), não houve entupimentos, embora tenham sido observadas (pelo visor) irregularidades no escoamento. Tais perturbações podiam ser vistas como variações no volume de pó formado no *gap* durante a rotação do Tambor. Materiais triturados e pós atomizados de faixa granulométrica extremamente discordante dos padrões não escoam neste ADP.

Como não houve a tendência ao entupimento na manipulação dos materiais apresentados na Figura 3.15 (b) e (c), foi possível realizar soldas. No entanto, o escoamento perturbado mencionado anteriormente promoveu uma alimentação cíclica. A Figura 3.16 ilustra sequências de imagens de trechos de filmes que mostram a dificuldade na manipulação destes pós pelo ADP.

A Figura 3.16 (a) apresenta imagens do *gap* durante a rotação do Tambor, onde foram observadas irregularidades na reconstituição da pilha de pó formada, fato causado pelo escoamento errático destes materiais através do Canal de Queda. O fenômeno provoca variações periódicas no volume dosado, como se pode observar na sequência de imagens expostas pelas figuras 3.16 (b) e (c). Soldas realizadas nestas condições, apresentadas na Figura 3.17, revelaram a influência deste fenômeno na superfície dos cordões. Os pulsos de alimentação formaram depósitos com superfície ondulada (efeito intensificado com o aumento da velocidade de soldagem), prejudicando a qualidade superficial dos depósitos PTA-P.

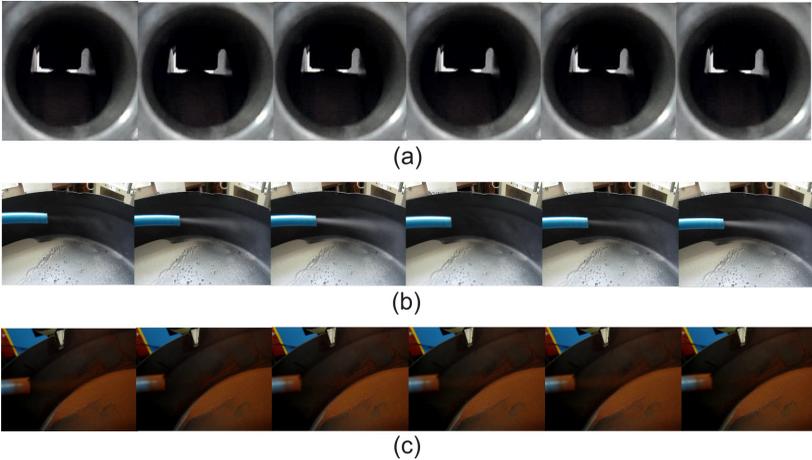


Figura 3.16 – Manipulação de pós alternativos (fotos extraídas em intervalos de 2 s): a) variação do volume de pó formado no *gap*; b) alimentação pulsada do Inox 316L; c) alimentação pulsada do Bronze

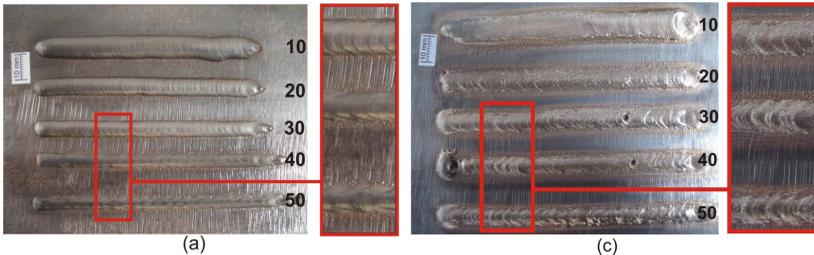
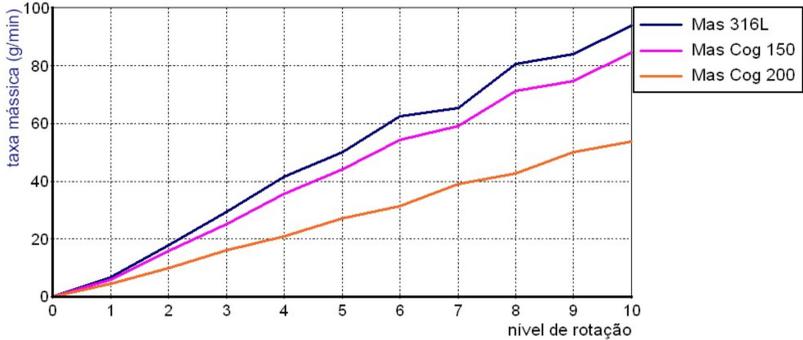


Figura 3.17 – Cordões realizados com alimentação perturbada (números indicam a velocidade de soldagem empregada): a) Inox 316L; b) Bronze

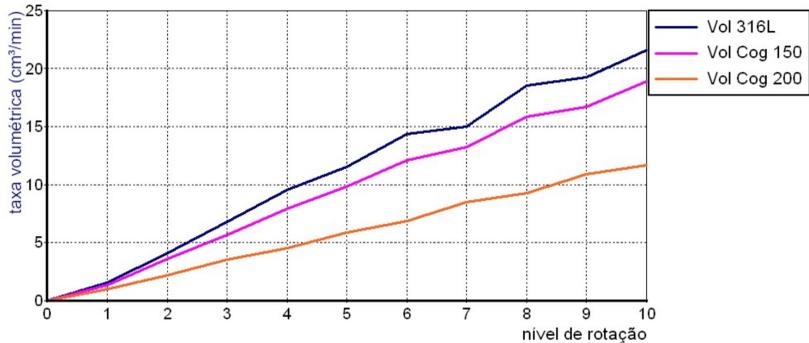
A dosagem promovida pelo ADP de Tambor operando com pós tradicionais sofreu, como também consta no relatório [36], forte influência das propriedades de escoamento específicas de cada pó. A Figura 3.18 mostra que materiais ensaiados sob as mesmas condições não resultaram em curvas com concordância mássica ou volumétrica. Ensaio envolvendo o mesmo material com faixas granulométricas diferentes revelaram discrepâncias da ordem de 33% na vazão mássica para a mesma rotação e mesmo *gap*.

A dosagem do material em função da variação do *gap* também foi averiguada. A Figura 3.19 mostra o comportamento não linear da vazão mássica para os mesmos três materiais ensaiados anteriormente. Este comportamento, com tendência exponencial, se deve à variação de

volume de material compreendido entre o tambor e o tubo de queda. Não há também concordância mássica entre as curvas dos três materiais ensaiados.



(a)



(b)

Figura 3.18 – Comportamento da taxa de alimentação em função da rotação do Tambor Dosador, relatório LABSOLDA [36]: a) taxa mássica; b) taxa volumétrica

A Figura 3.20 apresenta imagens da silhueta das pilhas de pó formadas por *gap's* diferentes. Observa-se nesta figura que, com o aumento do *gap*, a silhueta muda não só sua altura, mas também altera aos poucos o seu perfil, indicando variação no volume de dosagem.

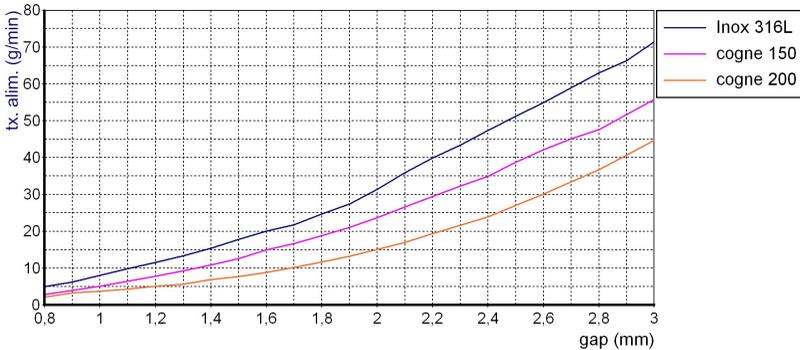


Figura 3.19 – Comportamento da taxa mássica em função da variação do *gap*, relatório LABSOLDA [36]

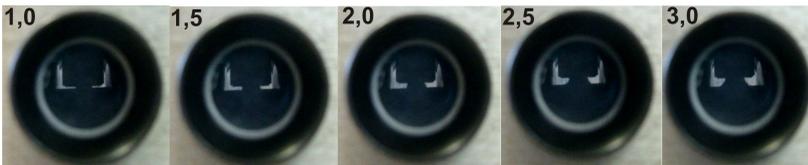


Figura 3.20 – Imagens da pilha de pó formada no *gap* de acordo com as alturas indicadas no canto superior esquerdo de cada ilustração (em mm), relatório LABSOLDA [36]

3.4 SÍNTESE DESTE CAPÍTULO

Os estudos apresentados neste capítulo revelaram que os alimentadores disponíveis não manipulam materiais alternativos com robustez e, por isso, seu uso pode comprometer o desenvolvimento de ligas. Também ficou claro que os sistemas avaliados apresentam dificuldades no envio de consumíveis contra a gravidade, empregando vazões de gás de arraste próximas aos níveis normais. Tal fato os desqualifica para a alimentação de consumível na soldagem PTA-P fora de posição. Além dos fatos comentados, as experiências transpareceram outra carência.

Os ADP's estudados não permitem a regulagem direta da taxa mássica de alimentação em suas interfaces. Isto faz com que o operador não tenha uma noção imediata da quantidade de material que está depositando, o que dificulta muito sua sensibilidade para a busca de melhores parâmetros. A relação entre a taxa mássica e a rotação dos

elementos de dosagem é encontrada pela obtenção de curvas de calibração. Nesta operação deve-se monitorar a massa dispensada pelo ADP com uma balança apropriada, para vários níveis de rotação. Isto é necessário porque os mecanismos de dosagem destes ADP's são altamente afetados pelas propriedades morfológicas e granulométricas de cada material.

Tal problema seria eliminado se existisse um transdutor capaz de medir a vazão de pó, o que permitiria fechar a malha de controle da taxa de alimentação. No entanto, a inexistência comercial de tal transdutor restringe as opções de controle às tecnologias de malha aberta, exigindo robustez e eficiência dos mecanismos de dosagem. Apesar dos esforços de Silva [6], que desenvolveu um sistema capaz de captar um sinal elétrico referente ao fluxo de pó na mangueira, a tecnologia ainda não foi dominada a ponto de ser empregada. Mesmo assim, recomenda-se que o ADP a ser desenvolvido permita a regulação da taxa mássica em sua interface, além da manipulação de materiais tradicionais e alternativos com baixas vazões de gás de arraste.

4 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE PÓ PARA SOLDAGEM PTA-P

De acordo com as limitações apresentadas no Capítulo 3, foi decidido explorar um novo conceito em alimentação de material para o processo PTA-P. Dentre as tecnologias de dosagem conhecidas, abordadas no Capítulo 2 deste trabalho, optou-se por adotar o mecanismo de válvula rotativa.

Uma válvula rotativa pode contribuir para que se obtenha um ADP capaz de permitir a regulagem direta da taxa mássica de alimentação. A dosagem volumétrica se baseia no confinamento do material em cavidades com volumes definidos (V_{po}), minimizando os impactos causados pelas propriedades de escoamento dos pós. Uma vez que a massa (m_{po}) e o volume (V_{po}) se relacionam de acordo com a Equação 4.1, se forem minimizadas as influências da escoabilidade dos materiais, a massa pode ser prevista em função do volume (Equação 4.2). Isto implica que, da mesma forma, a taxa mássica de alimentação desejada (txm) fica atrelada à taxa volumétrica (txV) como, por fim, expressa a Equação 4.3.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{po}}{V_{po}} \quad (4.1)$$

$$m_{po} = V_{po} \times \rho_{ap} \quad (4.2)$$

$$txm = txV \times \rho_{ap} \quad (4.3)$$

No equacionamento, pode se constatar que tal previsão depende do conhecimento da densidade aparente (ρ_{ap}) do material a ser utilizado. Geralmente este dado é fornecido pelo fabricante no *datasheet* dos pós. Por outro lado, quando se elaboram misturas, torna-se difícil prever a densidade aparente resultante. Mesmo assim, tal grandeza pode ser determinada por meio de um procedimento normatizado (Metal Powders Industries Federation [37]), consideravelmente mais prático e seguro, comparado aos métodos de calibração empregados atualmente.

Entretanto, a dosagem volumétrica concedida por uma válvula rotativa acontece de forma intermitente, fato prejudicial à alimentação. Contudo, tal problema pode ser atenuado pela utilização do Fluidizador

em conjunto com a válvula rotativa, pois este foi capaz de amortecer consideravelmente as irregularidades da alimentação do ADP de Fuso. Tal componente também permite a utilização de uma mangueira de menor diâmetro e, assim, fornece condições para soldagem PTA-P fora de posição sem depender de vazões abusivas de gás de arraste.

Assim sendo, o ADP será chamado de VR-F devido a seus principais mecanismos, ou seja, “VR” de Válvula Rotativa e “F” de Fluidizador. Deve também possuir um reservatório, ou silo, para armazenamento do consumível de solda, além de viabilizar a conexão de uma mangueira de transporte pneumático. A Figura 4.1, esquematiza o equipamento e relaciona os componentes do sistema mecânico com suas funções, nas etapas de alimentação dos pós.

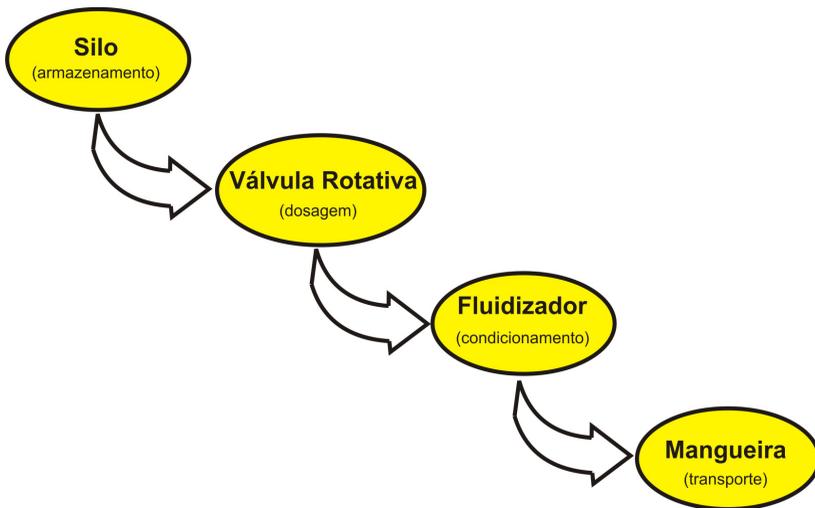


Figura 4.1 – Principais componentes do ADP VR-F e suas funções

4.1 ASPECTOS GERAIS DO ADP VR-F

O desenvolvimento do ADP VR-F abrangeu, além do projeto e fabricação dos dispositivos e estruturas que o formam mecanicamente (Silo, Válvula Rotativa e Fluidizador), um Gabinete de Comando de seu atuador (um motor elétrico que aciona a Válvula Rotativa). A concepção deste gabinete envolveu a seleção dos elementos do acionamento e exigiu o desenvolvimento de um *software* de controle. A Figura 4.2

apresenta uma visão geral do equipamento e aponta seus principais componentes.

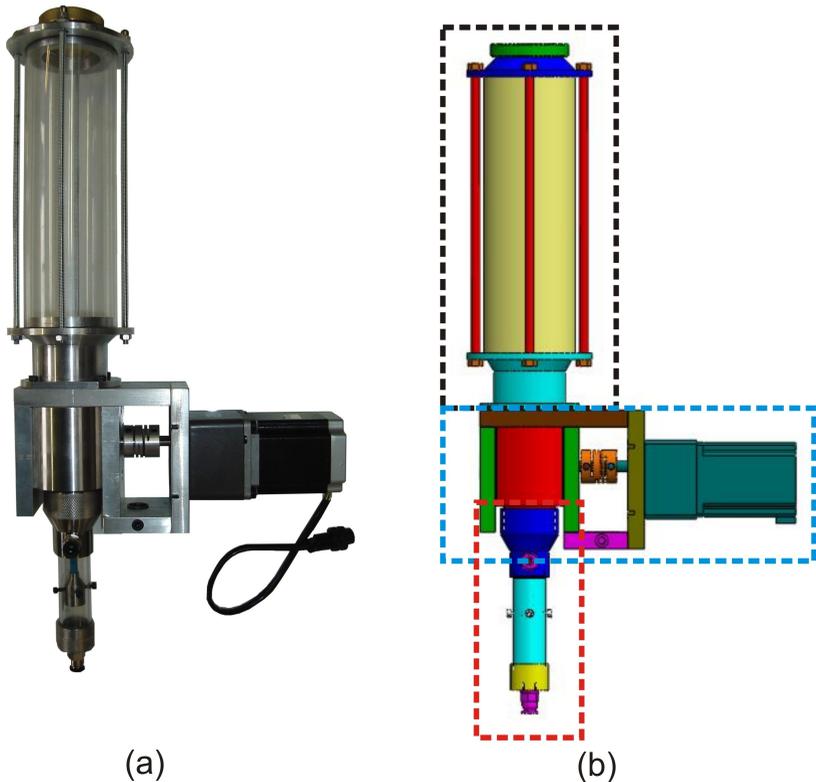


Figura 4.2 – ADP VR-F: a) visão geral do equipamento fabricado; b) projeto em CAD com Silo (contorno em preto), Válvula Rotativa (contorno azul) e Fluidizador (contorno em vermelho)

A integração entre alimentador, comando e tocha de soldagem exigiu alguns acessórios. A ligação entre o ADP e o Gabinete de Comando é feita através do Cabo do Motor. A ativação do equipamento pode ser feita pelo operador através do Cabo de Disparo (quando controlado pelo Gabinete de Comando). Para conexão com a tocha de soldagem (linha de transporte pneumático) foram selecionadas mangueiras de duas bitolas (3,5 e 2,0 mm de diâmetro interno), sendo estas intercambiáveis se usada uma Conexão Redutora. A fixação do ADP VR-F é realizada instalando-o em um pedestal, que o conserva a

uma altura de 1 a 1,6 m. A Figura 4.3 traz imagens dos componentes e acessórios comentados, os quais acompanham o ADP VR-F.



Figura 4.3 – Componentes e acessórios do ADP VR-F

Os próximos itens deste capítulo abordam o desenvolvimento do projeto mecânico, eletroeletrônico e do software de controle do ADP VR-F.

4.2 DESENVOLVIMENTO MECÂNICO DO ADP VR-F

A seguir serão detalhadas as estruturas e funções de cada componente mecânico que constitui o ADP VR-F.

4.2.1 Silo

O reservatório de pó do ADP VR-F foi projetado para armazenar e permitir o escoamento livre de materiais tradicionais e alternativos. Serão abordados aspectos gerais de sua estrutura e detalhes importantes para o armazenamento e escoamento dos pós. O Silo é composto basicamente por um Tubo, uma Base e uma Cobertura. A Figura 4.4 apresenta com detalhes sua estrutura.

A vedação do Silo contra vazamentos do gás de arraste contido em seu interior é realizada por *O'Rings* presentes na Tampa e nas extremidades do Tubo, como se pode constatar pela vista explodida da Figura 4.4 (a). Este, por sua vez, é pressionado por tensores (barras roscadas) contra a Base e a Cobertura.

Como mostrado na Figura 4.4 (b), ao se remover a Tampa, pode-se inserir no ADP a quantidade de pó desejada através do Canal de Alimentação existente na Cobertura. O pó armazenado flui por gravidade pelo Canal de Descarga da Base, sendo direcionado ao mecanismo da Válvula Rotativa.

O Silo do ADP VR-F foi projetado com base nos reservatórios dos ADP's conhecidos, levando em consideração suas vantagens e deficiências nas funções de estocar e escoar o pó inserido em seu interior. Para favorecer o escoamento dos pós (principalmente os alternativos), buscando o preenchimento rápido e completo das Cavidades do Rotor da Válvula Rotativa, o diâmetro do Canal de Descarga foi aumentado, como mostrado na Figura 4.5.

Enquanto o Canal de Descarga nos ADP's de Tambor e de Fuso apresentam 4 e 3 mm, respectivamente, no VR-F esta passagem foi aumentada para 25 mm. Tal característica reduz os riscos de defeitos de escoamento como formação de arco ou caminho de rato, pois faz com que maior parte da pressão do material estocado aja contra as forças de coesão na região de queda. Neste caso, as partículas também dispõem de maior espaço para se reorganizarem em favor do escoamento.

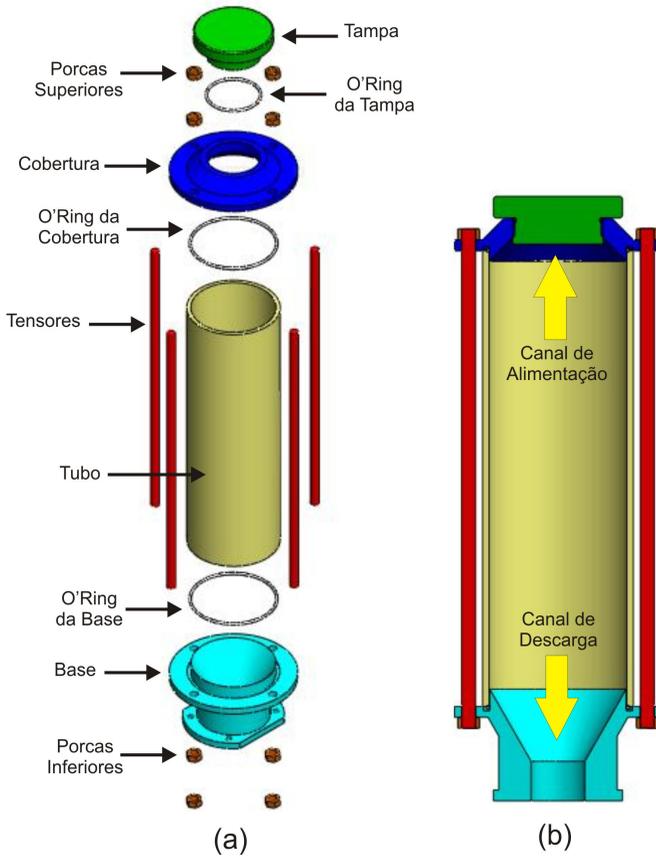


Figura 4.4 – Desenho do Silo em ambiente CAD: a) vista explodida da estrutura; b) estrutura em corte frontal com principais canais

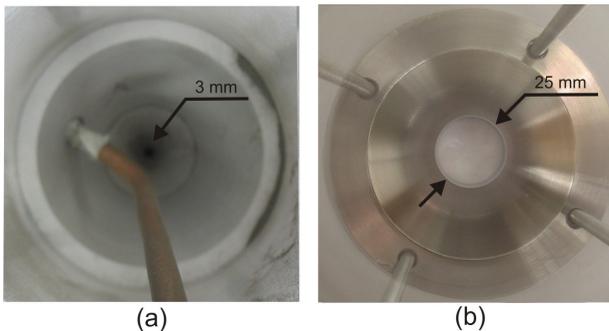


Figura 4.5 – Canais de descarga: a) ADP de Fuso Horizontal; b) ADP VR-F

No projeto do Silo do ADP VR-F, o ângulo de inclinação da Base foi adotado do reservatório do ADP de Fuso. Ribeiro [9], trabalhando no desenvolvimento de ligas resistentes à cavitação partindo de misturas envolvendo pós triturados, enfrentou dificuldades de escoamento no silo, cuja inclinação da base apresentava 30° em relação à linha horizontal. Pelo método da medição do ângulo de empilhamento dos pós, verificou que o projeto estava adequado para a liga Stellite 6 atomizada, a qual formou um ângulo em torno de 28° . O ângulo de empilhamento de sua mistura apresentou aproximadamente 36° , maior que o ângulo de inclinação da própria base. Solucionou o problema com o aumento deste ângulo para 60° . Assim sendo, decidiu-se manter esta característica. A Figura 4.6 ilustra a inclinação das bases comentadas e também o procedimento de medição do ângulo de empilhamento de pós metálicos realizado pelo autor.

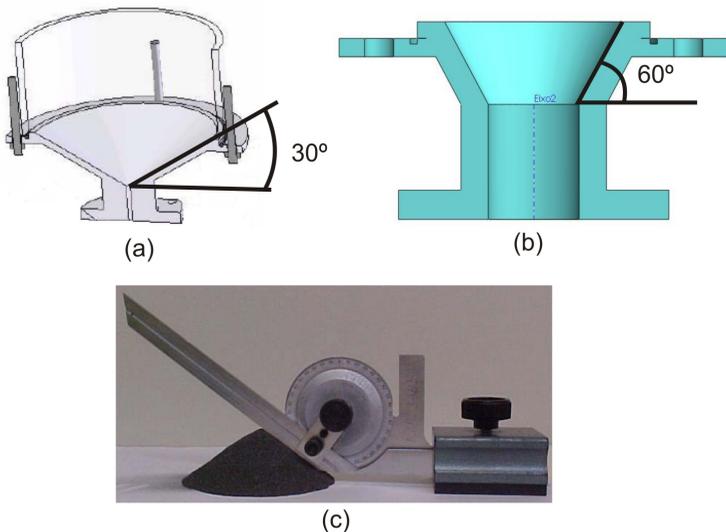


Figura 4.6 – Determinação da inclinação da base, Ribeiro [9]: a) modelo original da base do ADP de Fuso; b) base com inclinação reavaliada; c) procedimento de medida do ângulo de empilhamento

Embora tenha sido corrigido o ângulo de inclinação, a base do reservatório do ADP de Fuso apresenta uma borda plana, onde muitas partículas tendem a ficarem retidas ao invés de escoarem. Na Figura 4.7, há uma imagem do referido fenômeno exposta no item (a). No projeto do Silo do ADP VR-F, esta borda foi eliminada. Outro detalhe herdado

do reservatório do ADP de Fuso se trata do afunilamento do interior da Cobertura, que permite maior facilidade no esvaziamento do Silo pelo Canal de Alimentação. No ADP de Tambor, a cobertura do silo é plana, impondo dificuldades na retirada do material restante das operações de soldagem. Embora a cobertura do reservatório do ADP de Fuso apresente esta característica, esta possui a mesma borda plana da base, também omitida no projeto do novo Silo. As correções comentadas anteriormente são ilustradas na Figura 4.7 (b).

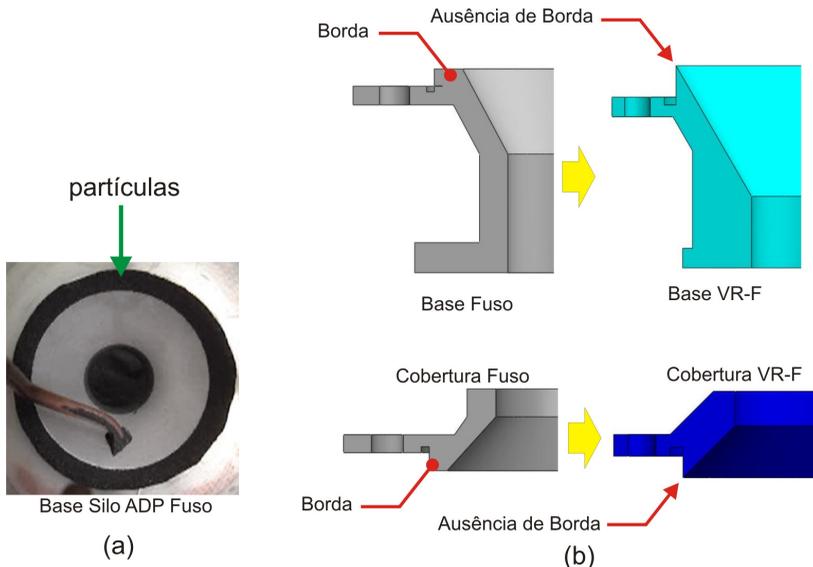


Figura 4.7 – Detalhes de projeto do Silo do ADP VR-F: a) fenômeno de retenção de partículas nas bordas do silo do ADP de Fuso adaptado; b) providências tomadas no projeto do novo Silo

4.2.2 Válvula Rotativa

A Válvula Rotativa é constituída basicamente por um rotor que, acionado por um motor, revoluciona no interior de um alojamento, chamado Corpo da Válvula. Este possui um canal superior que permite a entrada do material no mecanismo, denominado Canal de Admissão. Também apresenta um canal inferior, ou Canal de Dispensa, através do qual as partículas deixam a válvula. A Figura 4.8 detalha o mecanismo

da Válvula Rotativa e ilustra os referidos canais de passagem do material.

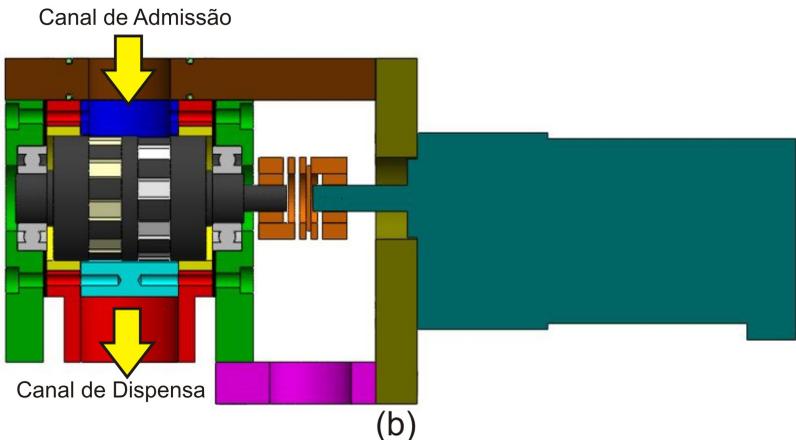
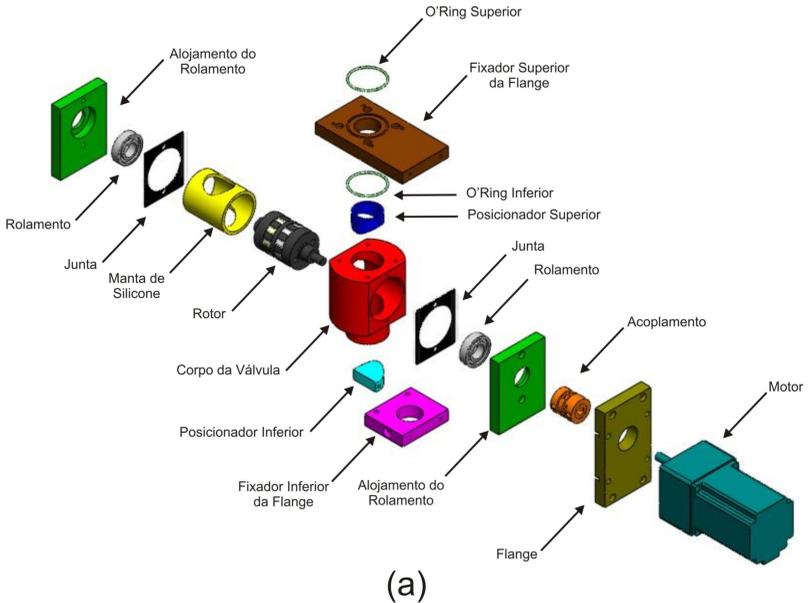


Figura 4.8 – Válvula Rotativa projetada em CAD: a) vista explodida; b) mecanismo montado em corte frontal (com exceção do Rotor)

A manipulação acontece conforme o esquema apresentado na Figura 4.9. Na ilustração da Figura 4.9 (a) percebe-se que, quando o

material contido no Silo se deposita por gravidade sobre o Rotor, as partículas invadem as cavidades expostas ao Canal de Admissão. Com a rotação, as cavidades são encobertas pela Manta de Silicone, aprisionando as partículas em porções. O material confinado é arrastado até o Canal de Dispensa, onde as Cavidades são novamente abertas e as partículas são libertadas para o Fluidizador.

Como mostrado na Figura 4.9 (b) em uma situação real, o Rotor possui duas seqüências de cavidades de modo que estas se posicionam com defasagem. Assim, quando uma está completando a dispensa do pó outra já está iniciando, o que garante uma dosagem mais contínua se comparada às válvulas rotativas convencionais (com apenas uma seqüência de cavidades).

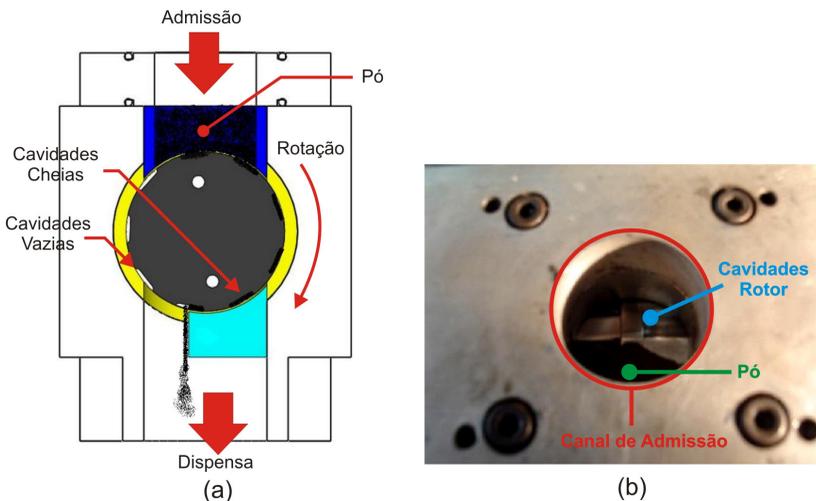


Figura 4.9 – Manipulação de materiais pelo mecanismo da Válvula Rotativa: a) esquema de manipulação do pó no interior do mecanismo; b) imagem da Válvula Rotativa em operação

As cavidades foram projetadas para favorecer tanto o seu preenchimento com materiais tradicionais e alternativos, como o seu esvaziamento. As bordas frontais e traseiras do fundo das cavidades são arredondadas para favorecer a dispensa das partículas. Seu volume interno foi projetado com o auxílio do CAD, de maneira que a soma do volume de todas as cavidades resultasse o mais próximo possível de 1 cm³. No entanto o valor mais aproximado possível foi de 1,02 cm³, sendo este o Volume Nominal dosado por cada volta completa do Rotor.

Como se pode notar nas ilustrações do projeto (Figura 4.8), a parede do Corpo da Válvula onde se aloja o Rotor é revestida por uma Manta de Silicone que, segundo o fabricante [38], possui alta resistência ao desgaste por atrito e ao rasgamento.

A necessidade da manta surgiu de um problema ocorrido em um protótipo anterior, cujo rotor e corpo desta válvula apresentavam superfícies rígidas em contato direto. Após alguns dias em funcionamento, foi observado (além da alta tendência a travamento) desgaste acentuado nas paredes do corpo e no rotor, como se pode observar na Figura 4.10, itens (a) e (b), respectivamente.

Acredita-se que a causa do desgaste baseia-se no fato do mecanismo aplicar esforços de cisalhamento em algumas partículas no fim do encerramento das cavidades, fato ilustrado pelo desenho exposto no item (c) da mesma figura. A localização e o aspecto das erosões indicam que a tendência ao cisalhamento de partículas ocorre, com maior frequência, na região central da extremidade das cavidades, devido ao seu formato semicircular. Uma vez iniciado, o processo de desgaste gera uma região preferencial para a ocorrência do fenômeno mostrando-se, com isso, mais acentuado em determinadas áreas.

O desgaste deve ser evitado, pois promove a descaracterização das propriedades de dosagem do ADP e reduz sua vida útil. Em virtude disto, as Cavidades do Rotor da atual válvula são retangulares, como se pode observar na Figura 4.9 (b). Busca-se, com isto, distribuir a ocorrência do referido fenômeno ao longo das bordas.

O uso da manta concede elasticidade à parede do corpo, característica que inibe o efeito de cisalhamento das partículas, pois a manta se deformará, aceitando fragmentos no interior das cavidades.

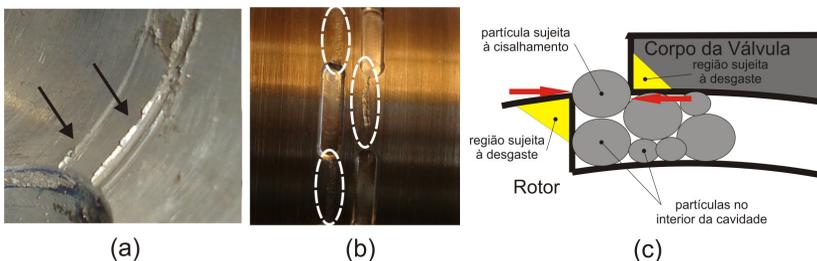


Figura 4.10 – Desgaste no primeiro protótipo da Válvula Rotativa: a) desgaste no corpo indicado por setas (formação de duas pistas côncavas); b) desgaste nas bordas das Cavidades do Rotor (áreas circuladas); c) fenômeno de cisalhamento com setas vermelhas indicando esforços do Rotor e do Corpo da Válvula contra partículas de pó

A Manta de Silicone foi fabricada com duas aberturas circulares que se alinham ao Canal de Admissão e ao Canal de Dispensa, permitindo assim, a passagem do pó através do mecanismo. Como a manta não pode ser colada à parede do alojamento (para facilitar a reposição), foram inseridas no projeto duas peças, chamadas posicionadores. São conectadas aos referidos canais formando um ressalto em suas bordas e mantendo, com isso, a manta posicionada. No entanto, o ressalto formado possui altura 0,5 mm menor que a espessura da manta. Esta folga é necessária, pois se a altura fosse igual provocaria o desgaste do Rotor e dos posicionadores, como já aconteceu. A Figura 4.11 mostra como são instalados os posicionadores e a manta no Corpo da Válvula.

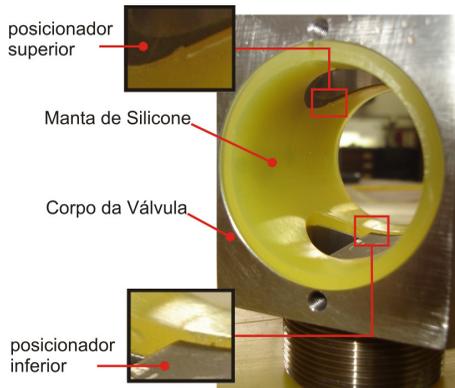


Figura 4.11 – Corpo da Válvula revestido internamente pela Manta de Silicone. Nos detalhes, a diferença de nível entre a superfície da manta e dos posicionadores

O Posicionador Inferior, também mostrado na Figura 4.11, consiste em uma peça maciça com secção transversal semicircular. Possui duas funções: manter o alinhamento entre a abertura inferior da manta e o Canal de Dispensa e limitar a queda das partículas. Tal limite é necessário, pois, sem esta peça, todas as partículas contidas em uma cavidade cairiam juntas no início do movimento descendente, fato que poderia provocar fortes perturbações em baixas rotações. O Posicionador Inferior desloca o início do canal para uma posição de modo que as Cápsulas são abertas quando se movimentam no sentido ascendente, fazendo com que somente as partículas que ultrapassam a extremidade do posicionador sejam libertadas, suavizando as esperadas perturbações.

O gás de arraste inserido no Fluidizador deve sair somente pela linha de transporte pneumático, pois, do contrário, vazamentos podem reduzir a vazão de gás na mangueira e comprometer a eficiência do transporte, além de contaminar o gás de arraste com ar atmosférico. Para impedir o vazamento de gás entre o Corpo da Válvula e os Alojamentos dos Rolamentos, foram utilizadas juntas de vedação apresentadas na Figura 4.12 (a). Já no Fixador Superior do Flange do Motor, foram utilizados *O'Rings* para vedar a junção da válvula com o Silo, como ilustra a Figura 4.12 (b).

Os rolamentos, utilizados para apoiar as extremidades do Rotor, também possuem funções de vedação. Devem resistir à infiltração de partículas, para que estas não o danifiquem e nem escapem para fora do sistema. Suas vedações (reforçada com retentores internos) também impedem a passagem do gás de arraste, garantindo a impermeabilidade do ADP. Um exemplar destes rolamentos é mostrado na Figura 4.12 (c).

A união entre o eixo do Rotor e o eixo do motor é efetuada por um acoplamento flexível, mostrado na Figura 4.12 (d). Tal componente tolera desalinhamento entre os eixos (resultantes da imperfeição das peças e da montagem), evitando o travamento do sistema e danos aos componentes do mecanismo.

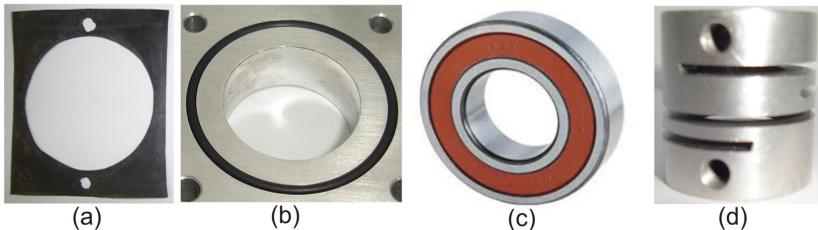


Figura 4.12 – Acessórios: a) junta de vedação; b) rolamento; c) *O'Ring*; d) Acoplamento

4.2.3 Fluidizador

As partículas dispensadas pela Válvula Rotativa caem no Fluidizador, detalhado na Figura 4.13. A função deste componente é atenuar as perturbações na alimentação de pó e permitir o transporte de partículas com uma mangueira de diâmetro interno menor que o normalmente empregado.

O projeto, cuja vista explodida é exibida na Figura 4.13 (a), se baseia no protótipo abordado no Capítulo 3 deste trabalho. Entretanto, algumas mudanças foram efetuadas. Como mostrado na Figura 4.13 (b), é no Fluidizador em que são conectadas a mangueira do gás de arraste e a linha de transporte pneumático.

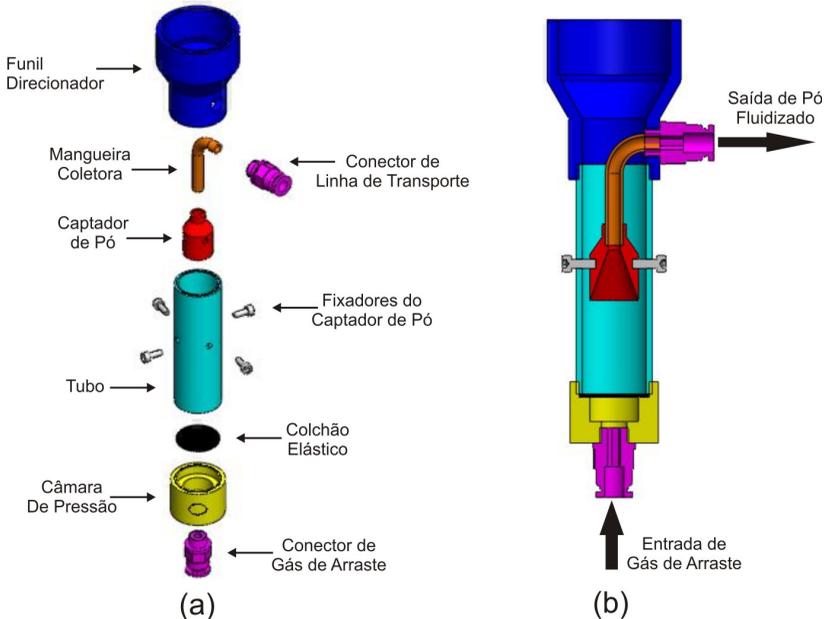


Figura 4.13 – Novo Fluidizador: a) vista explodida; b) vista frontal em corte da estrutura

No novo Fluidizador, as partículas dispensadas pela Válvula Rotativa são induzidas a caírem na base do Tubo pelo Funil Direcionador. Durante a queda, o Captador de Pó as desvia para as regiões periféricas da base, onde se acumulam e formam um leito fixo crescente que acaba por cobrir a região central. A base do Tubo é constituída por um Colchão Elástico cujo centro apresenta um minúsculo orifício que expede o gás de arraste. O gás, ao atingir as partículas que tendem a se depositar sobre o orifício, estabelece um canal diluído no leito, formado pelo lançamento vertical destas em forma de um jorro (nuvem de pó). A maioria das partículas arremessadas é inserida no Captador de Pó, que as encaminha para a linha de transporte pneumático por meio da Mangueira Coletora.

Quando o leito alcança certa altura, a quantidade de partículas inseridas no Fluidizador se equilibra com a porção que é lançada na linha de transporte, fazendo com que a alimentação entre em uma condição de regime. O Fluidizador em operação pode ser visualizado na Figura 4.14.

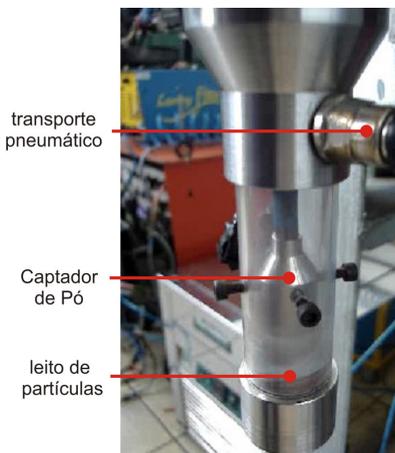


Figura 4.14 – Fluidizador em operação

A maneira como o pó se deposita sobre o Colchão Elástico influencia no amortecimento das perturbações. A Figura 4.15 esquematiza o fenômeno de atenuação das perturbações dentro do Fluidizador.

A quantidade de partículas arremessadas ao Captador de Pó depende da altura do leito (hL) nos arredores do canal diluído, pois o jato de gás se alimenta constantemente das partículas que se encontram nas suas periferias. Se esta altura variar (para uma vazão constante de gás de arraste) varia também o número de partículas presentes na região do jorro e, com isso, o número de partículas presentes no transporte pneumático.

A Figura 4.15 (a) ilustra como o Captador de Pó condiciona as partículas a caírem nas periferias do leito fixo, fazendo com que este acabe por apresentar superfície cônica devido ao acúmulo de material nesta região e ao consumo do pó da região central. A inclinação da superfície (φ_L) faz com que as partículas escorreguem continuamente para o centro, tendendo a preencher o espaço do material ejetado e manter a altura do leito no canal diluído.

Uma interrupção na alimentação, caso ilustrado pela Figura 4.15 (b), tende a reduzir, em um primeiro momento, a inclinação da

superfície. Isto não impede que as partículas continuem escorregando em direção ao fluxo de ar, fato que contribui para a manutenção da altura do leito nas proximidades do canal diluído. Entretanto, se a falha na alimentação se prolongar o bastante, caso ilustrado pela Figura 4.15 (c), o ângulo de inclinação da superfície do leito pode se igualar ao ângulo de empilhamento do material. Tal fenômeno interrompe o escorregamento das partículas para o centro e a altura do leito na região do jorro diminui, fazendo com que a quantidade de material lançada no transporte pneumático seja reduzida.

A redução do diâmetro da linha de transporte pode ser favorecida devido ao fato do Fluidizador ejetar o material já diluído em uma nuvem, composta por partículas que se deslocam em alta velocidade na direção do Captador de Pó.

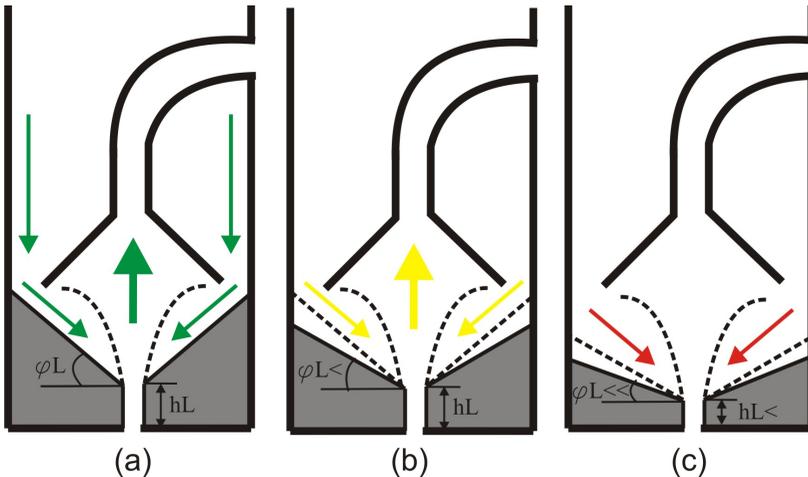


Figura 4.15 – Esquema de atenuação de perturbações no Fluidizador (deslocamento das partículas indicado pelas setas): a) leito em situação de regime por alimentação contínua; b) manutenção da altura do leito no canal diluído por si próprio; c) redução da altura do leito no canal diluído por falta de partículas se deslocando

4.2.4 Seleção da Mangueira de Transporte Pneumático

As mangueiras adotadas para a realização do transporte pneumático no ADP de Fuso eram constituídas de Cristal de PVC. No entanto, com pouco tempo de uso, deviam ser substituídas por

apresentar-se em mau estado. De fato, as áreas mais expostas ao calor do arco logo apresentavam rachaduras e deformações por conta das altas temperaturas, além das extremidades conectadas às vias de alimentação de pó (tubos de cobre) não suportarem o calor por muito tempo.

Notou-se que tochas PTA-P importadas, adquiridas pelo LABSOLDA, possuem, como via de alimentação de pó, mangueiras tradicionalmente empregadas em sistemas pneumáticos (azuis). Viu-se, então, que estas mangueiras são de Poliuretano, material que se mostrou mais resistente às altas temperaturas.

Tanto as mangueiras de Cristal de PVC (usadas antigamente no LABSOLDA) como as de poliuretano (que vêm instaladas às tochas importadas) apresentam 3,5 mm de diâmetro interno. Tais fatos caracterizam esta bitola como um valor típico empregado no processo PTA-P. Entretanto viu-se, no Capítulo 2, que o referido diâmetro não confere boas condições para o transporte pneumático de partículas contra a gravidade, isto empregando valores de vazão de gás em torno de 2,0 l/min. A Figura 4.16 exibe as mangueiras de Poliuretano e Cristal de PVC envolvidas nas atividades.

A velocidade das partículas (v_p) no transporte pneumático é diretamente proporcional à velocidade do gás (v_g). Assim, para aumentar a energia cinética das partículas transferidas (necessária ao envio do material contra a gravidade) conservando-se a vazão volumétrica de gás (va_g), é necessário reduzir o diâmetro da mangueira (d_m) de transporte, pois as grandezas envolvidas se relacionam, segundo Mills [39], de acordo com a Equação (4.4).

$$v_p \propto v_g = 4 \cdot \frac{va_g}{\pi \cdot d_m^2} \quad (4.4)$$

Como a Equação 4.4 sugere a redução de d_m , adotou-se no ADP VR-F um mangueira de poliuretano de 2,0 mm de diâmetro interno. Entretanto, o emprego desta bitola é aconselhado somente em taxas de alimentação de até 2 kg/h com vazões de gás de arraste de 2,5 l/min, sendo que, maiores taxas de alimentação provocam perturbações no transporte. Contudo, dentro deste campo, há liberdade de instalação do ADP VR-F em relação ao nível da tocha para qualquer posição de soldagem.

Para dimensionar o comprimento máximo permitido pelas condições de transporte conferidas pela mangueira de 2 mm, foi realizada uma experiência com uma via de Cristal de PVC. Embora não

seja esta a ideal para o transporte, permite visualizar o comportamento do pó em seu interior.

Durante a experiência, que envolveu uma taxa de alimentação de 2 kg/h e uma vazão de gás de 2,5 l/min, foi observado o fenômeno de precipitação do pó ao utilizar uma mangueira com o comprimento de 3,0 m. Para assegurar a qualidade da alimentação, foi adotado o comprimento de 2,5 m para a linha de transporte pneumático.

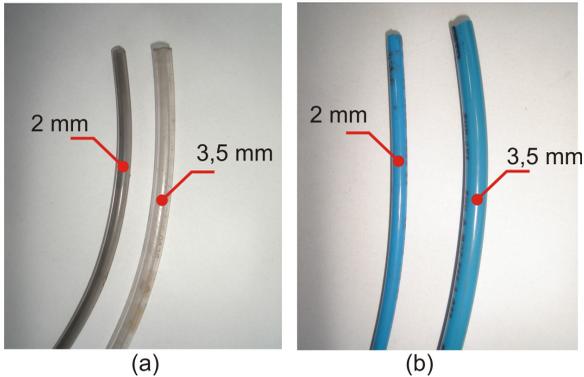


Figura 4.16 – Mangueiras empregadas para transporte pneumático com números indicando diâmetro interno: a) mangueiras Cristal de PVC; b) mangueiras de poliuretano

4.3 DESENVOLVIMENTO ELETROELETRÔNICO DO ADP VR-F

O desenvolvimento do sistema eletroeletrônico do ADP VR-F consistiu na construção de um gabinete de comando, o qual deve revolucionar o Rotor da Válvula Rotativa de acordo com valores de taxa mássica de pó nele inseridos. Sua concepção envolveu a seleção do acionamento (motor e *driver* entre si compatíveis), além da escolha de uma placa de controle e IHM.

O *driver* adotado foi integrado a uma fonte de soldagem dedicada ao processo PTA-P (entre outros), fabricada pela empresa IMC Soldagem para uso industrial. Possuindo tal componente esta fonte pode comandar o ADP pelo seu próprio controle, dispensando-o nas atividades de campo. Sendo assim, o gabinete somente é necessário quando o ADP for utilizado sem a fonte.

4.3.1 Acionamento do ADP VR-F

A dosagem de material efetuada pela Válvula Rotativa do ADP VR-F é dependente da velocidade de giro do Rotor, além da capacidade de dosagem volumétrica do mesmo. Necessitando somente do controle da velocidade, adotou-se o método de acionamento em malha aberta por motor de passo. Trata-se de uma tecnologia mais simples, uma vez que os motores de passo viabilizam o controle do movimento sem a necessidade de um *encoder*. O menor custo em relação aos métodos de acionamento em malha fechada, como relatado por Carvalho [31], também influenciou na escolha.

O motor selecionado foi o modelo AK57H/3G20-1,8 fornecido pela empresa Akiyama. É mostrado na Figura 4.17, juntamente com sua curva de desempenho de torque em função da velocidade.

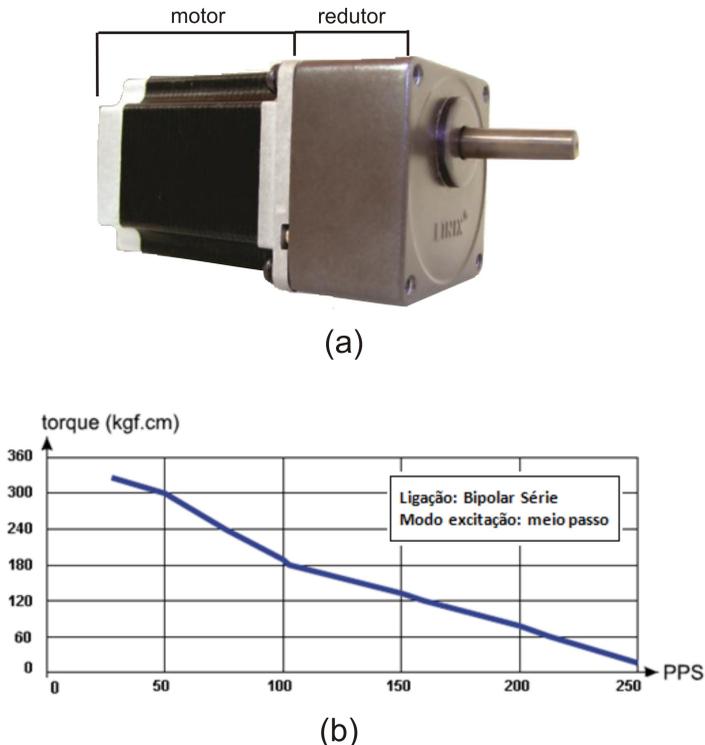


Figura 4.17 – Motor selecionado, Manual do Fabricante [40]: a) Imagem do AK57H/3G20-1,8; b) Curva de torque em função da frequência de pulsos

Trata-se de um motor de passo que, como se pode observar na Figura 4.17 (a), possui uma caixa de redução integrada a si. Tal redução mostrou-se necessária devido à solicitação de alto torque para o giro do Rotor da Válvula Rotativa. Na Figura 4.17 (b) é possível constatar que este motor pode apresentar um torque de até 350 kgf.cm em baixas rotações. As baixas rotações envolvidas também são benéficas para a aplicação, uma vez que o preenchimento completo das Cavidades do Rotor também depende do tempo de exposição das mesmas ao Canal de Admissão. A Tabela 4.1 contém dados extraídos do manual do fabricante [40].

Tabela 4.1 – Principais características do Motor de Passo AK57H/3G20-1,8 para ligação de bobinas em série.

ITEM	ESPECIFICAÇÃO
Ângulo do Passo	1,8°
Corrente	2,1 A/fase
Resistência	140 mΩ/fase
Impedância	8 mH/fase
Torque	350 kgf.cm
Peso	1,3 kg
Redução	1/20

Inicialmente foram realizados testes com *drivers* de motores de passo disponíveis no LABSOLDA. Com estes componentes não se conseguiu atingir rotações equivalentes a taxa mássica de 3 kg/h, pois o motor não era devidamente energizado para conferir o torque exigido neste nível de velocidade. Nesta etapa da concepção do ADP VR-F, alguns equipamentos desenvolvidos no LABSOLDA estavam em fase de testes com um *driver* chamado STR8, da empresa Applied Motion Products.

De acordo com o guia do usuário disponibilizado pela empresa [41], o STR8, detalhado na Figura 4.18, pode ser alimentado com tensões entre 24 e 75 V e impõe correntes de até 8 A, características que asseguram alta performance no controle de movimento. Este *driver* permite atuação em outras características importantes para um bom acionamento como, ajuste de corrente em repouso ou regime de rotação, seleção de rampas (partida e parada) de acordo com a carga e ajuste de resolução do ângulo de passo (micropasso).

O acionamento do motor é realizado pelo STR8 de acordo com sinais de passo (*Step*) e direção (*Dir*), emitidos ao mesmo por um controlador.

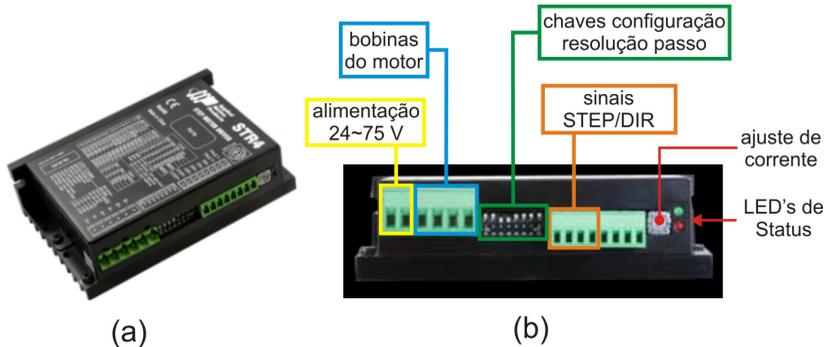


Figura 4.18 – Driver selecionado para acionamento do ADP VR-F, Guia do Usuário [41]: a) Imagem do STR8 em perspectiva; b) detalhes das interfaces para configurações e conexões

Considerou-se como satisfatório o desempenho mostrado pela curva da Figura 4.17 (b), alcançado pelo motor, conectando suas bobinas ao *driver* na configuração bipolar série e acionado em modo meio-passo, ou seja, 400 passos por volta. Para garantir tal desempenho, deve-se também regular a corrente de modo que sejam aplicados 2 A/fase. Tais configurações foram possíveis no *driver* STR8. Em testes preliminares, concedeu rotações ao motor equivalentes a taxas mássicas de aproximadamente 7 kg/h para pós tradicionais de ligas ferrosas utilizadas no LABSOLDA.

4.3.2 Desenvolvimento do Gabinete de Comando

A concepção do Gabinete de Comando do ADP VR-F exigiu, além do *driver* selecionado para o acionamento do motor da válvula, a integração de uma placa de controle adequada. A adoção de uma placa de controle desenvolvida no LABSOLDA, apresentada na Figura 4.19, mostrou-se viável. Consiste em uma placa eletrônica cuja arquitetura se baseia na tecnologia dos microcontroladores AT89C52 da família 8051, fabricados pela empresa Atmel. Nela são disponibilizados dois circuitos

retificadores, sendo um dedicado à alimentação do próprio microcontrolador e outro voltado para a alimentação do *driver*.

O *layout* de uma de suas faces (a placa é dupla-face) foi projetado para coincidir com as características da IHM do equipamento para o qual foi projetada. Na região central localiza-se um *display* de LCD (de oito caracteres) e, próximos a ele, foram instaladas chaves, ou botões, para entrada de dados.

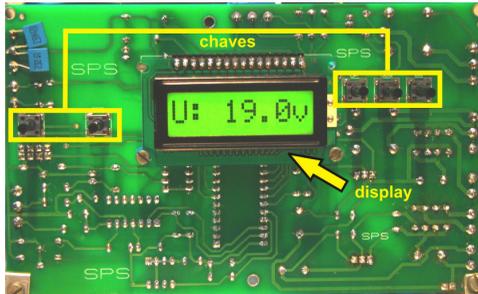


Figura 4.19 – Placa de controle com IHM integrada

Ao serem selecionados os principais componentes para a realização do controle do ADP VR-F, estes foram inseridos em um gabinete, sendo interligados de acordo com a configuração típica deste método de controle, abordada no Capítulo 2. A localização do *driver* e da placa de controle podem ser conferidas na Figura 4.20, que também mostra os transformadores utilizados para alimentação dos referidos componentes. Na Figura 4.21 estão expostos os esquemas de ligação dos circuitos de potência e de sinais.

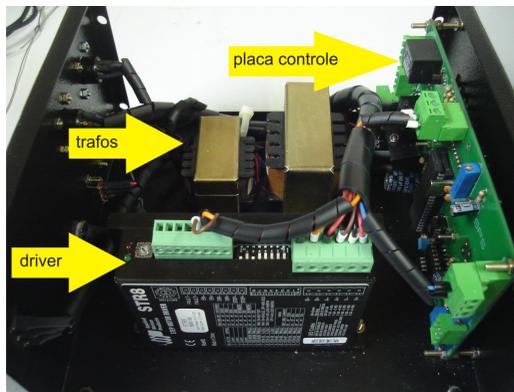


Figura 4.20 – Interior do gabinete da unidade de controle do ADP VR-F

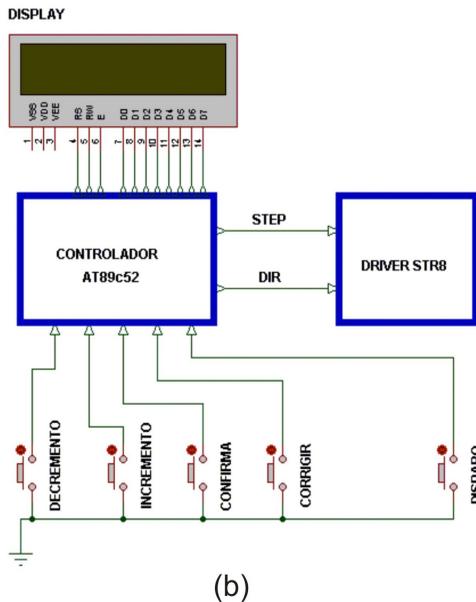
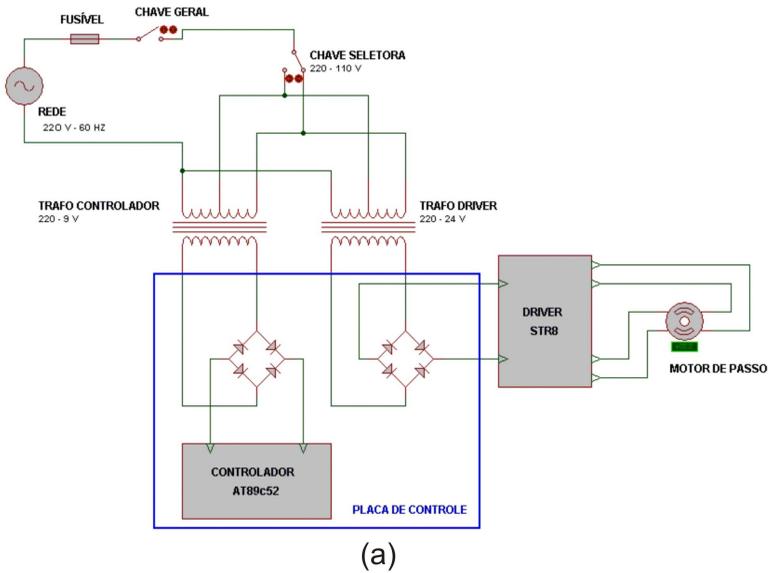


Figura 4.21 – Esquema de ligações elétricas da Unidade de Controle: a) circuito de potência; b) circuito de sinais

A Figura 4.22 mostra as faces do Gabinete de Comando. A face frontal do gabinete, na Figura 4.22 (a), é a IHM. Nela estão disponíveis a tela do *display* e os botões para entrada de dados. Para a regulagem das variáveis de entrada são disponibilizados botões de incremento (+) e decremento (-) de valores. Há dois outros botões: o Confirma, que aceita o valor configurado e o Corrige, para permitir a reformulação dos valores de entrada ou o cancelamento de funções.

A face traseira do gabinete, Figura 4.22 (b) disponibiliza as conexões com a rede de energia elétrica, com o motor do ADP e com o disparo. Há também, além da cápsula do fusível, dois interruptores: a chave geral e a chave seletora da tensão de alimentação.



(a)



(b)

Figura 4.22 – Interfaces do Gabinete de Comando: a) parte frontal com IHM; b) parte traseira com conexões

4.4 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE DE COMANDO DO ADP VR-F

O desenvolvimento do Gabinete de Comando exigiu a elaboração de um programa capaz de realizar o controle do ADP VR-F de acordo com as necessidades do operador e do processo PTA-P. O *software* desenvolvido apresenta duas funções principais: o controle por rotação e por taxa mássica.

O controle por rotação permite que o operador configure a velocidade desejada ao Rotor da Válvula Rotativa. Tal forma de controle deverá ser empregada para a realização de calibrações do equipamento ou mesmo o controle de outros ADP's.

A regulação direta da taxa mássica de alimentação implica na necessidade de se obter um modelo matemático capaz de configurar o sinal *Step* (velocidade) em função das variáveis de entrada (taxa mássica e densidade aparente do consumível a ser manipulado).

4.4.1 Cálculo do Período do Sinal Step em Função da Taxa de Alimentação e da Densidade Aparente

As variáveis de entrada serão reguladas em unidades mais familiares ao operador. O valor de rotação será expresso em rpm, a taxa mássica de alimentação em kg/h e a densidade aparente em g/cm³. Entretanto, para que o *software* construa o sinal *Step*, estes valores devem ser transformados, viabilizando o uso de unidades compatíveis com o sistema mecânico e com as próprias variáveis de entrada, ou seja, o sistema grau, grama, segundo, centímetro.

O operador poderá regular a taxa mássica (txm) desejada entrando também com o valor da densidade aparente (ρ_{ap}). Tais valores determinarão a velocidade que o Rotor deve girar para fornecer a taxa volumétrica (txV) de material correspondente a taxa mássica requerida, como expressa a Equação 4.5.

$$txV = \frac{txm}{\rho_{ap}} \quad (4.5)$$

No entanto, para realizar esta operação com os dados de entrada, suas unidades devem ser compatíveis. Por isto o *software* deve realizar a adequação de unidades, como mostrado na operação 4.6.

$$txm(g/s) = \frac{txm(kg/h) \cdot 1000}{3600} \Rightarrow txm(kg/h) \cdot 0,28 \quad (4.6)$$

A taxa volumétrica de alimentação equivale a uma velocidade angular para o Rotor (ω_R), necessária para o cálculo do período entre pulsos do sinal *Step*. A taxa volumétrica é transformada em velocidade angular por meio da Equação 4.7, onde é dividida pelo volume dosado por cada grau de movimentação do Rotor (V_g).

$$\omega_R = \frac{txV}{V_g} \quad (4.7)$$

O volume V_g é constante. Seu valor corresponde à divisão do volume nominal de dosagem (V_n) (sendo este dimensionado como 1,02 cm³ na construção da Válvula Rotativa) pelo número de graus equivalente a uma volta completa, ou seja, 360°. A operação 4.8 fornece o valor de V_g .

$$V_g = \frac{V_n}{360^\circ} = \frac{1,02}{360} = 0,0028 \text{ cm}^3/\text{grau} \quad (4.8)$$

O valor obtido para a velocidade angular do Rotor deve ser empregado para calcular a frequência de pulsos (f_p), por meio da Equação 4.9.

$$f_p = \frac{\omega_R}{R_{red}} \quad (4.9)$$

O denominador da Equação 4.9 é uma constante que corresponde à resolução do passo do eixo do redutor (R_{red}), determinada pela resolução do motor (R_m) (valendo 0,9° devido ao acionamento em meio-passo) dividido pelo valor da redução (Red) (que equivale a 20 vezes), como mostra a operação 4.10.

$$R_{red} = \frac{R_m}{Re d} = \frac{0,9^\circ}{20} = 0,045^\circ \quad (4.10)$$

O conhecimento da frequência de pulsos pelo *software* permite que este chegue ao valor do período entre pulsos (T_p), sendo este o inverso da frequência, como mostra a Equação 4.11.

$$T_p = \frac{1}{f_p} \quad (4.11)$$

Por meio do valor de T_p o programa pode configurar o sinal *Step* e, assim, o controlador pode transmiti-lo ao *driver*, que acionará o motor na rotação correspondente a taxa mássica desejada.

4.4.2 Lógica de Controle do ADP VR-F

No Controlador do ADP VR-F foi inserido um software com funções dedicadas ao controle de rotação e de vazão mássica, que permitirão a calibração e regulagem da taxa mássica pelo operador. O programa foi escrito em linguagem C, utilizando o *software* μ Vision 2®, da empresa Keil. A Figura 4.23 apresenta um fluxograma que descreve o programa principal.

No fluxograma da Figura 4.23 nota-se que, após uma mensagem inicial, é aberta a opção de regulagem do ADP pela rotação (Função Rotação). Confirmando esta função (botão Confirma), pode ser regulado o valor desejado de rotação. Se dispensada esta função (botão Corrige), será aberta a função de regulagem do ADP pela taxa mássica (Função Taxa Mássica).

Como o *display* aceita apenas oito caracteres, as mensagens maiores aparecem em sequência, repetindo até que as instruções sejam aceitas, rejeitadas ou corrigidas. A Figura 4.24 apresenta as telas das funções de Rotação e Taxa Mássica. As setas entre as instruções e suas respectivas unidades indicam que estas aparecem alternadamente no *display*.

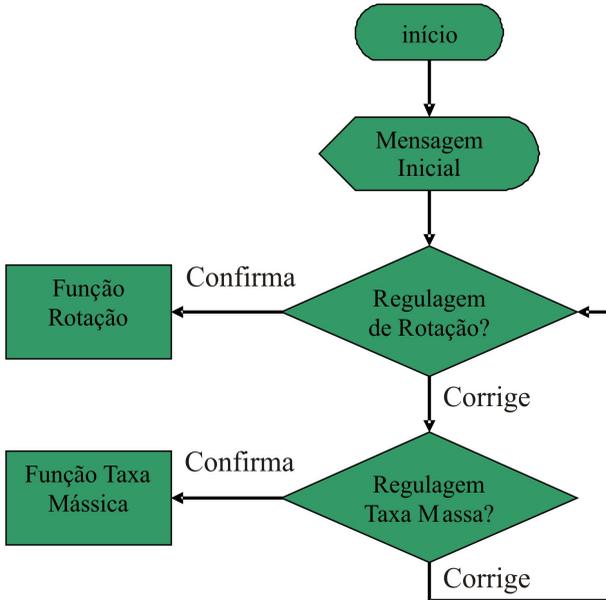


Figura 4.23 – Fluxograma do programa principal do software de controle

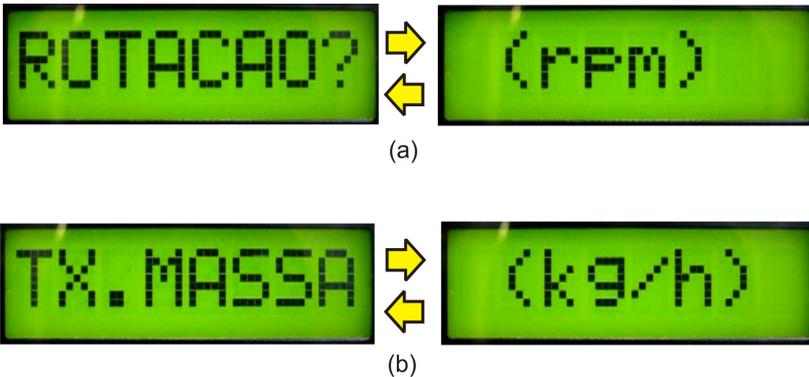


Figura 4.24 – Telas das funções de Rotação e Taxa Mássica associadas às suas respectivas unidades

A Função Rotação é esquematizada pelo fluxograma da Figura 4.25. Uma vez selecionando a Função Rotação no programa principal, pode-se entrar com o valor de rotação. Após a entrada do valor o programa escreve na tela a palavra PAUSA e, enquanto estiver impressa, o operador pode sair da função. Ao acionar o Disparo, a palavra ALIMENTA aparece na tela enquanto o Rotor gira na rotação

desejada. A Figura 4.26 mostra as telas que são disponibilizadas na Função Rotação.

A Função Taxa Mássica é representada pelo fluxograma da Figura 4.27. Nesta função, o operador deve entrar com dois valores: a taxa mássica desejada (em kg/h) e a densidade aparente (em g/cm³) do material a ser manipulado.

No restante, a lógica de construção desta função é semelhante à da Função Rotação. A manipulação do material é considerada em PAUSA até que o Disparo seja acionado e, para retornar ao início, o Rotor deve estar parado. As telas de entrada de dados desta função são apresentadas na Figura 4.28, em ordem de impressão no *display*.

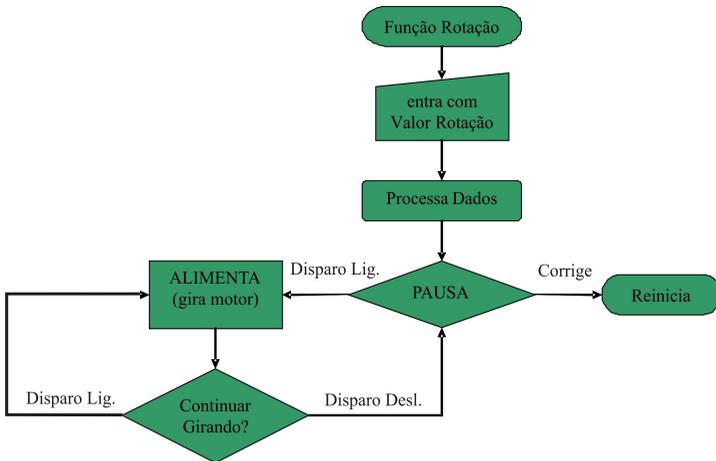


Figura 4.25 – Fluxograma da Função Rotação



(a)



(b)



(c)

Figura 4.26 – Telas de Função Rotação: a) entrada de valor de rotação; b) alimentação de material; c) pausa na alimentação

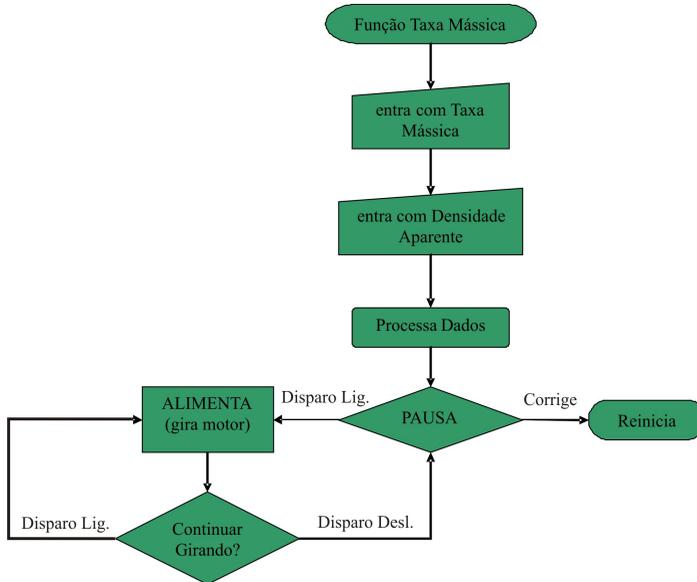


Figura 4.27 – Fluxograma da Função Taxa Mássica

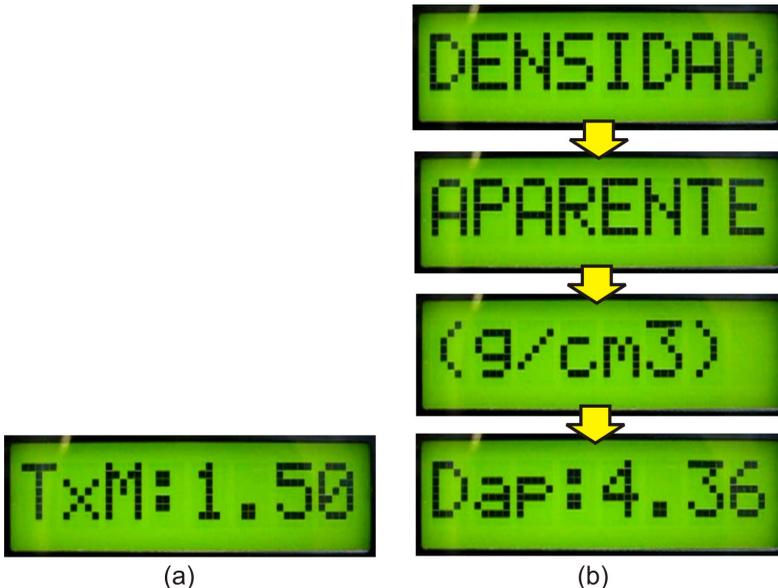


Figura 4.28 – Telas de Função Taxa Mássica: a) entrada de valor de Taxa Mássica; b) sequência de instruções para entrada de valor de Densidade Aparente

4.5 SÍNTESE DESTE CAPÍTULO

Em função das deficiências relacionadas ao transporte, alimentação e dosagem de alguns tipos de pós pelos ADP's disponíveis, o novo sistema de alimentação de pó foi projetado com dispositivos não convencionais.

Sua estrutura mecânica é composta por um Silo (reservatório), uma Válvula Rotativa, para realização da dosagem dos materiais e um dispositivo chamado Fluidizador. As funções deste último consistem em atenuar as perturbações provenientes da dosagem da válvula rotativa e permitir o emprego de uma mangueira mais delgada. A finalidade da redução do diâmetro da mangueira empregada consiste em transportar as partículas com maior velocidade para que não sejam necessárias altas vazões de gás de arraste no transporte em oposição à gravidade.

Para acionar o mecanismo da Válvula Rotativa foi adotada a tecnologia de controle em malha aberta. Um motor de passo com uma caixa de redução integrada foi selecionado em função do torque exigido para mover o Rotor da válvula. Para atingir a maior faixa de rotação possível, foi empregado um *driver* capaz de alimentar o motor com altas correntes de maneira suave, sendo um dispositivo adequado para fornecer altos torques também em altas rotações.

O *software* foi elaborado para fornecer dois modos diferentes de controle. Pela interface do Gabinete de Comando o operador pode regular a rotação do rotor da válvula, alternativa útil para a realização de calibrações ou para quando o operador desconhecer a densidade aparente do material. Entretanto, quando a densidade aparente é conhecida, o sistema permite a regulação direta da taxa mássica desejada, poupando o operador de constantes calibrações.

5 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO ADP VR-F

O desenvolvimento do ADP VR-F baseou-se em informações obtidas pela avaliação prática dos outros alimentadores disponíveis no LABSOLDA e, também, em propostas de mecanismos abordadas na literatura. No entanto, fez-se necessária a avaliação deste ADP nos aspectos de propriedades de alimentação e em operações de soldagem. Os resultados obtidos foram alcançados por meio de atividades que envolveram procedimentos, equipamentos e materiais também abordados neste capítulo.

5.1 CARACTERÍSTICAS DE ALIMENTAÇÃO

As experiências empreendidas para caracterizar o comportamento de dosagem do ADP VR-F consistiram em testes de linearidade e repetitividade. Os ensaios de repetitividade revelaram, além da capacidade do equipamento em repetir valores de dosagem volumétrica, o volume efetivo de dosagem por volta completa do Rotor, permitindo a comparação com o valor nominal (projetado), ou seja, a calibração do ADP. Os testes de linearidade permitiram visualizar se o equipamento tende a fornecer dosagem volumétrica semelhante para diferentes pós, isto é, se o alimentador de fato permitiu a regulação direta da taxa mássica.

5.1.1 Materiais Selecionados

A Figura 5.1 ilustra os aspectos morfológicos e granulométricos de sete materiais. Estes pós foram selecionados, dentre os disponíveis no LABSOLDA, para a avaliação operacional do ADP VR-F. Foram escolhidos por cobrirem um grande campo de características, possíveis de serem apresentadas por pós usados em desenvolvimento de ligas experimentais. Um bom desempenho com estes materiais significa robustez e flexibilidade por parte do ADP no desenvolvimento de ligas.

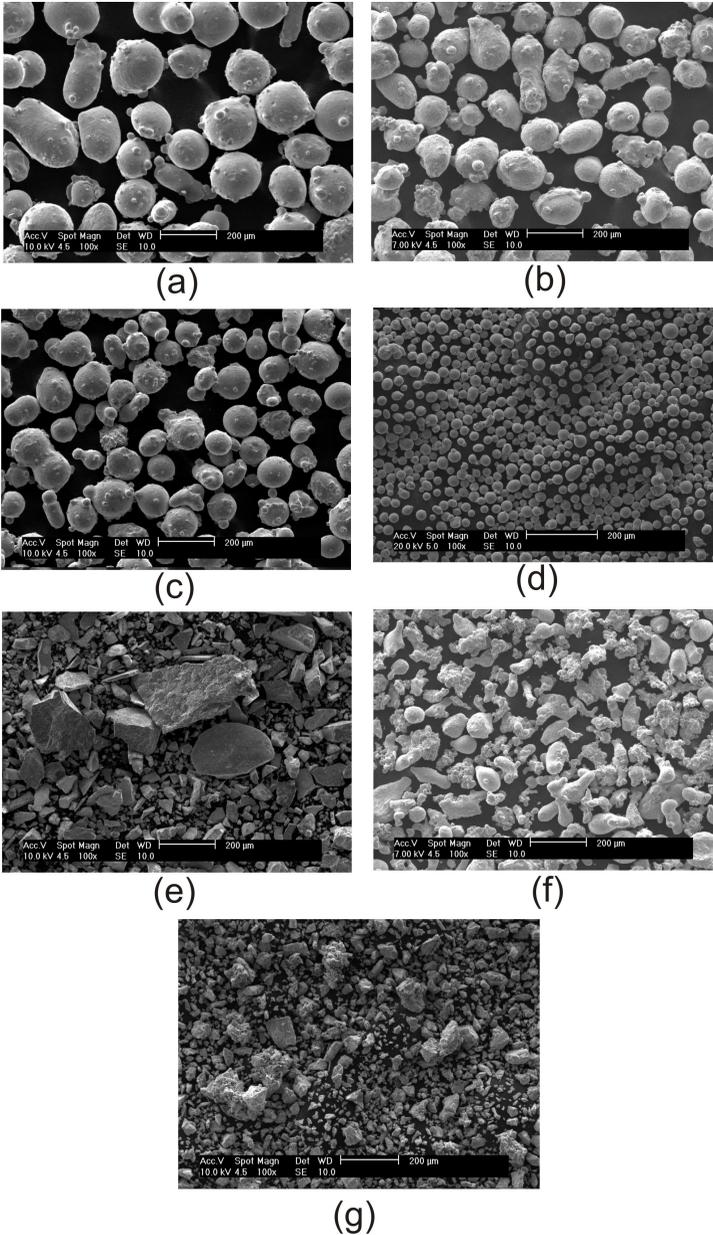


Figura 5.1 – Pós metálicos utilizados em testes de avaliação do ADP VR-F: a) COG 150; b) COG 200; c) Inconel 625; d) Inox 316L; e) Fe-Ni; f) Bronze pré-ligado; g) Manganês

A Tabela 5.1 relaciona os nomes dos pós selecionados com suas características mais relevantes para a avaliação.

Tabela 5.1 – Materiais selecionados para avaliação do ADP VR-F.

Material	Classificação	Morfologia	Granulometria
COG 150	Tradicional	Esférica	+50-150 μm
COG 200	Tradicional	Esférica	+53-200 μm
Inconel 625	Tradicional	Esférica	+53-150 μm
Inox 316L 45	Alternativo	Esférica	+11-45 μm
Fe-Ni	Alternativo	Irregular	+15-500 μm
Bronze	Alternativo	Irregular	+40-200 μm
Manganês	Alternativo	Irregular	+5-150 μm

5.1.2 Bancada e Procedimento dos Ensaios

As características de alimentação do ADP VR-F foram avaliadas em uma bancada montada para permitir o monitoramento da massa dispensada em função do tempo ou da rotação do Rotor da Válvula Rotativa. Sua configuração, mostrada na Figura 5.2, permitiu a realização de ensaios de repetitividade e linearidade do sistema.

Na Figura 5.2 pode-se observar que a bancada foi formada principalmente pelo ADP VR-F (número 1) e pelo Gabinete de Comando (ainda em fase de protótipo) (2). Também conta com um recipiente com um orifício na tampa ligeiramente maior que o diâmetro externo da mangueira, uma balança da marca Bel com capacidade de medição de até 3000,00 g com resolução de 0,05 g (4) e um tripé para fixação de uma câmera digital Sony Cyber-Shot (5). Foram empregados também um cilindro de argônio (6) e uma válvula controladora de vazão de gás de faixa de medição entre 0,0 e 5,0 l/min com resolução de 0,1 l/min fabricada pela empresa Aalborg.

Para realizar os ensaios, primeiramente era regulada a rotação desejada no Gabinete de Comando (Função Rotação). Após o acionamento do motor do ADP (com 1000 g de pó no Silo) iniciava-se a filmagem do display da balança com a câmera digital. Dessa forma era monitorado o acúmulo da massa de pó enviada pelo ADP ao recipiente durante o intervalo de 1 minuto.

Nos testes de linearidade o procedimento relatado foi realizado cinco vezes para cada pó, envolvendo rotações de 0,5 à 5,0 rpm, em intervalos de 0,5 rpm. Já os testes de repetitividade consistiram no monitoramento da massa para a rotação de 1 rpm cinco vezes repetidas, procedimento realizado da mesma maneira para cada um dos materiais.

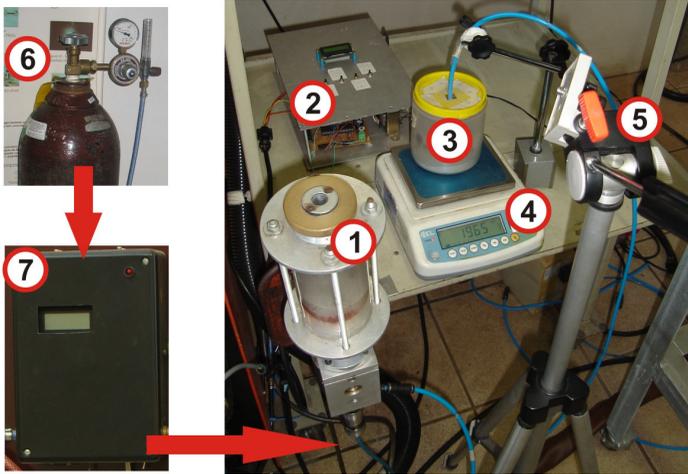


Figura 5.2 – Bancada para ensaios de repetitividade e linearidade

5.1.3 Processamento dos Dados

Os valores de massa foram extraídos dos arquivos de filme com o auxílio do software Windows Movie Maker®, que permite paralisar os vídeos em intervalos de 80 milissegundos. Posteriormente, tais valores foram agrupados em planilhas no programa FlexPro 6.0®, para processamento dos dados (determinação de média e desvio-padrão em cada caso) e confecção de gráficos.

O volume (V_{po}) dosado pela Válvula Rotativa será estimado indiretamente, por meio da medição da massa (m_{po}) e da densidade aparente (ρ_{ap}), já que estas grandezas se relacionam matematicamente de acordo com a Equação (5.1).

$$V_{po} = \frac{m_{po}}{\rho_{ap}} \quad (5.1)$$

A determinação da densidade aparente foi realizada por meio de um procedimento normatizado [37], o qual exigiu a fabricação de uma estrutura chamada Aparato de Hall e de um recipiente de 25 cm³ de volume interno. A Figura 5.3 apresenta uma sequência de imagens que ilustram cada fase do procedimento de medição da densidade aparente.

No funil original do aparato não escoaram o 316L Fino e o pó de Manganês. Assim, para estimar a densidade aparente destes materiais, foi necessário utilizar um funil alternativo, mostrado na Figura 5.3 (e), com canal de descarga de maior diâmetro.

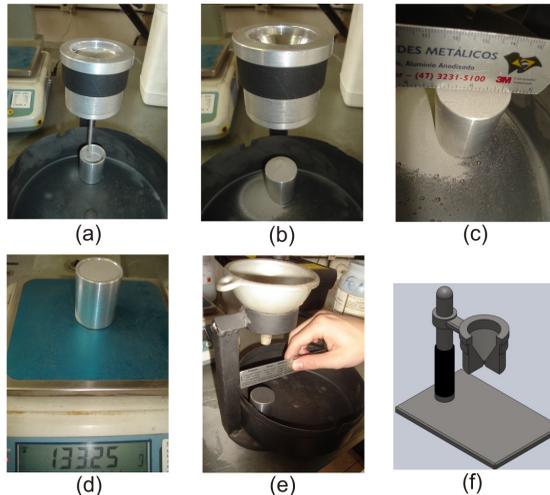


Figura 5.3 – Procedimento para determinação da densidade aparente: a) escoamento do material do funil para o recipiente; b) material excedente no topo do recipiente; c) planificação da superfície do pó; d) pesagem da massa contida no recipiente; e) procedimento com funil alternativo para pós de difícil escoamento; f) Aparato de Hall em ambiente CAD

5.1.4 Resultados

Neste item serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nas experiências de repetitividade e linearidade do ADP VR-F. No entanto, antes de proceder com os referidos testes, foi realizada uma avaliação visual da saída da linha de transporte pneumático. Tais observações buscaram averiguar a regularidade do jato de pó, resultante da manipulação dos sete materiais selecionados.

Para cada material manipulado foram realizadas filmagens da extremidade da linha de transporte, das quais foram extraídas as seqüências de imagens em intervalos de 450 ms, com o auxílio do programa Windows Movie Maker®. Os resultados destas observações, filmadas, são ilustrados na Figura 5.4.

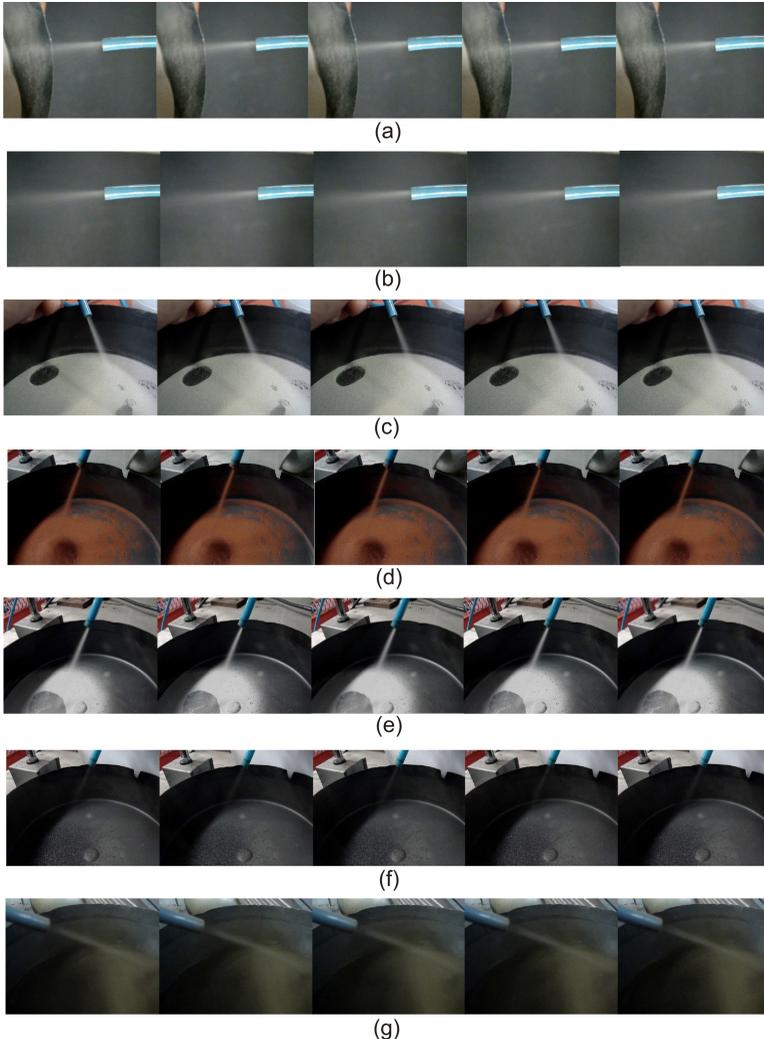


Figura 5.4 – Sequências de imagens da saída da linha de transporte pneumático do ADP VR-F: a) COG 150; b) COG 200; c) Inconel 625; d) Bronze; e) Inox 316L Fino; f) Fe-Ni; g) Manganês

O ADP VR-F foi eficiente na alimentação dos materiais testados. Em todos os casos foi observado um jato de partículas rígido e constante, isento de perturbações visíveis. Associando os resultados a um bom funcionamento do ADP, partiu-se para os ensaios de repetitividade e linearidade.

5.1.4.1 Repetitividade de Dosagem do ADP VR-F

A Tabela 5.2 agrupa os valores processados de média e desvio-padrão resultantes dos testes de repetitividade volumétrica, realizados para cada material. Também relaciona estes com suas respectivas densidades aparentes, encontradas por meio do procedimento relatado no item anterior. O Volume Efetivo (V_{ef}) de dosagem foi obtido extraíndo-se a média dos volumes médios conferidos para cada pó, podendo ser este comparado com o Volume Nominal (V_n) projetado.

Tabela 5.2 – Repetitividade volumétrica do ADP VR-F.

Material	D. Aparente (g/cm³)	Vol. Médios (cm³)	Desv. padrão (cm³)
Inconel	4,22	1,48	0,014
COG 150	4,05	1,47	0,009
COG 200	4,47	1,51	0,014
316L Fino	4,14	1,43	0,048
Fe-Ni	2,49	1,45	0,043
Bronze	3,85	1,43	0,026
Manganês	2,10	1,38	0,054
V. Efetivo	-	1,44	0,043

De acordo com os dados agrupados na Tabela 5.2, o Volume Efetivo de dosagem (1,44 cm³) mostrou-se muito superior (em quase 30%) ao Volume Nominal (1,02 cm³). Por outro lado, o ADP VR-F apresentou dosagem volumétrica considerada repetitiva, pois o desvio-padrão do Volume Efetivo (0,043 cm³) representa menos de 3% do seu valor.

Os valores expostos na Tabela 5.2 também sugerem que a Válvula Rotativa encontrou dificuldade pouco maior na manipulação

dos pós alternativos, fato caracterizado pelos valores mais altos de desvio-padrão obtidos para estes materiais. Por exemplo, para o pó de manganês (caso mais grave), o desvio-padrão foi de $0,054 \text{ cm}^3$, que corresponde a aproximadamente de 4% do seu volume médio. Já no caso do Inconel 625 o desvio-padrão foi de $0,014 \text{ cm}^3$, representando menos de 1% do volume médio.

Os volumes médios dos pós alternativos também apresentaram tendência a serem mais baixos, comparados aos valores obtidos com os pós tradicionais.

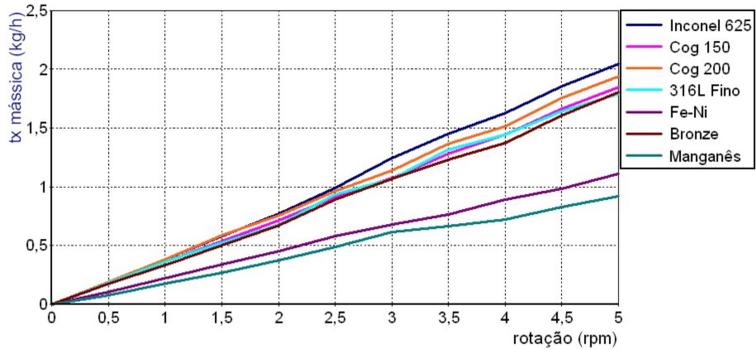
5.1.4.2 Linearidade De Dosagem do ADP VR-F

A Figura 5.5 traz os gráficos com as curvas correspondentes para cada material experimentado.

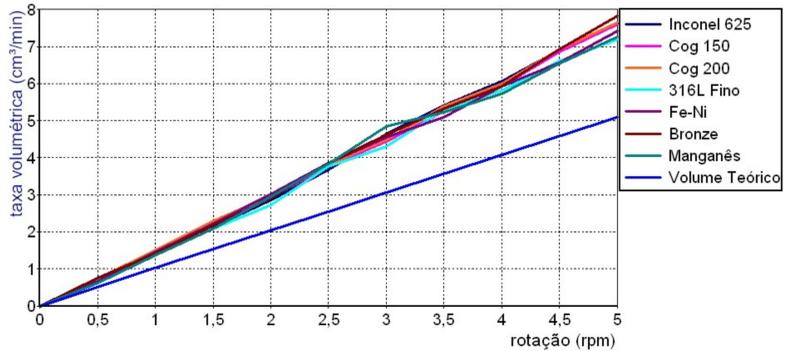
Na Figura 5.5 (a) estão expostas as curvas de taxa mássica em função da rotação. Este gráfico permite constatar que há tendência linear para a dosagem de todos os materiais testados. Ao longo das curvas, dispersas entre si, há pequenas oscilações, as quais se acentuam nas curvas do Inox 316L Fino e do pó de Manganês.

A Figura 5.5 (b), que ilustra a evolução da taxa volumétrica em função da rotação, resulta da relação entre os dados de massa e a densidade aparente de cada material. Pode-se observar, neste gráfico, que as curvas tendem a se sobrepor, indicando que a dosagem volumétrica da Válvula Rotativa se dá de forma semelhante para todos os materiais manipulados. Neste gráfico também foi traçada uma curva baseada no volume nominal (volume projetado), a qual permite uma comparação dos resultados esperados com os obtidos.

No intervalo de 4,0 a 5,0 rpm foi observado um tênue desvio das curvas correspondentes aos materiais 316L Fino, Fe-Ni e Manganês. Neste intervalo, pode-se perceber que, como nos ensaios de repetitividade, ocorreu uma tendência à redução do volume dosado para os materiais alternativos.



(a)



(b)

Figura 5.5 – Linearidade do ADP VR-F na dosagem dos sete materiais selecionados: a) linearidade mássica; b) linearidade volumétrica

5.2 TESTES EM SOLDAGEM

As operações de soldagem PTA-P nas quais o ADP VR-F foi envolvido visaram avaliar as condições de alimentação fornecidas pelo equipamento em função do aspecto dos depósitos, realizados com materiais tradicionais e alternativos. Neste item, será também relatada uma aplicação do referido alimentador na soldagem de uma liga anti-cavitação (em desenvolvimento no LABSOLDA) e seu emprego na deposição (por PTA-P) de materiais experimentais fora de posição, inclusive, nas próprias turbinas hidráulicas.

5.2.1 Bancada de Ensaio

As experiências foram conduzidas na bancada PTA-P do LABSOLDA, exibida na Figura 5.6.

A fonte de soldagem que compõe a bancada, detalhada na Figura 5.7, se trata da DigiPlus A7 (número 1 na Figura 5.6), fabricada pela empresa IMC Soldagem.

Ao lado da fonte situa-se a UR-2 (número 2 na figura), com a função de forçar a passagem de água no interior da tocha (número 4) por um sistema de bomba e radiador.

Além do ADP VR-F (3), alimentado com energia elétrica e gás pela DigiPlus A7, foram necessários outros equipamentos para realizar as soldas em laboratório, entre eles um robô cartesiano para movimentar automaticamente a tocha, chamado Tartílope V2 (5).

Como a pesquisa PTA-P no LABSOLDA visa aplicação do referido processo em posições forçadas, foi construída uma mesa de soldagem (7) que permite o posicionamento da peça e da tocha em todas as posições. Possui barras roscadas que permitem a regulagem da inclinação do trilho do tartílope de 0 a 45° e por uma mesa auxiliar de dois graus de liberdade (6).

Como gás de proteção, plasma e arraste foi empregado o argônio puro, proveniente de cilindros instalados à cerca de três metros da bancada. Um deles possui um medidor de vazão para o gás de proteção. O outro, um regulador de pressão com saída formato “Y” para conexão dos gases de plasma e arraste.

Como mostrado na Figura 5.7 (a), a referida fonte integra a maioria dos periféricos exigidos para a realização da soldagem PTA-P. É equipada com um processador chamado ARM 7, que permite sua atuação em diversas modalidades de soldagem, incluindo o processo PTA-P. Possui em seu interior o ignitor de alta frequência e a fonte auxiliar (módulo plasma), as válvulas de controle de vazão do gás plasma e de arraste e o driver STR8, para controlar o ADP. O gás de proteção pode ser apenas habilitado por uma válvula (abre-fecha) integrada à fonte.

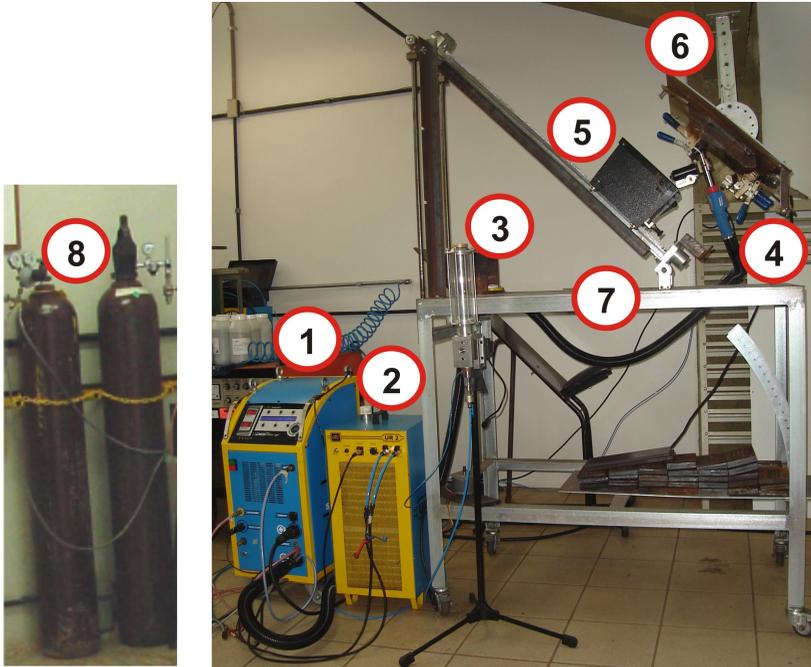


Figura 5.6 – Bancada de soldagem PTA-P (LABSOLDA)

Sua IHM, detalhada nas ilustrações (b) e (c) da Figura 5.7 (extraídas do manual do equipamento [42]), permite a configuração dos valores e do comportamento das variáveis durante a soldagem (rampas), cujo sincronismo é garantido por software.

O emprego da fonte DigiPlus A7 permitiu reduzir drasticamente o espaço ocupado pelo equipamento PTA-P, comparando com as bancadas modulares utilizadas por Silva, Díaz e Ribeiro [6, 8, 9]. A referida fonte pode facilitar a aplicação do processo PTA-P nas turbinas hidráulicas, reduzindo o tempo de instalação dos equipamentos e o espaço ocupado por este, devido à integração dos periféricos.

Os ensaios de soldagem destinados à avaliação do ADP VR-F envolveram dois modelos de Tochas PTA-P, ilustrados na Figura 5.8. Uma delas trata-se de uma tocha modelo PLP 300, fabricada pela empresa TBI, a qual possui uma mangueira de transporte pneumático de diâmetro interno de 3,5 mm. O referido modelo possui dois circuitos de refrigeração, um para o bico e outro para o corpo da tocha (parte de contato com o eletrodo). A utilização desta implica em incorporar uma unidade de refrigeração adicional à bancada apresentada.

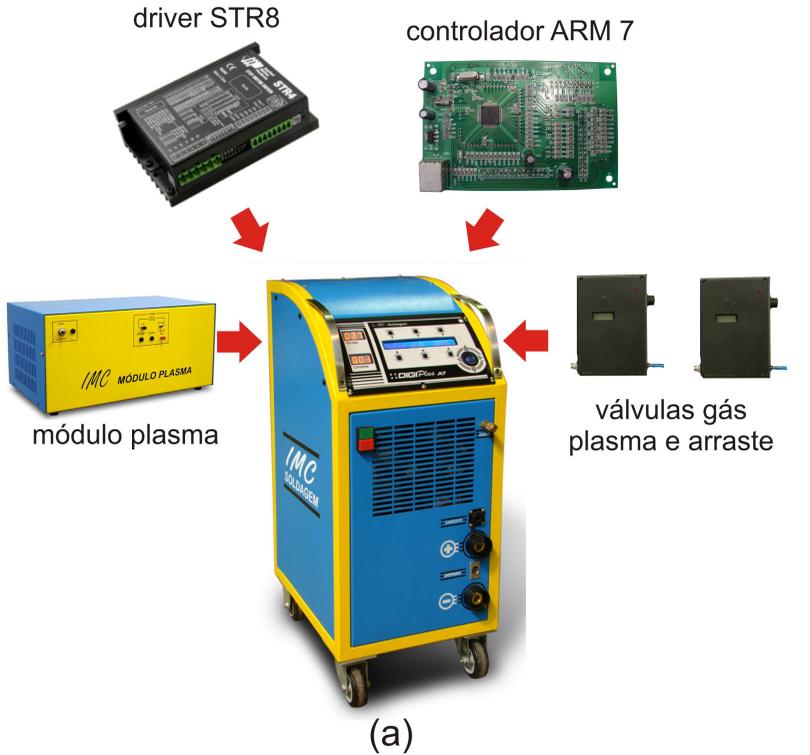


Figura 5.7 – Fonte de soldagem Digiplus A7: a) periféricos de soldagem integrados à fonte; b) IHM [42]; c) elementos da IHM [42]

A outra tocha empregada é de fabricação própria do LABSOLDA, concebida por Silva [6] em sua tese de doutorado. Foi projetada para favorecer a soldagem em posições forçadas, pois nela

vem instalada a mangueira de 2,0 mm de diâmetro interno. Outra característica relevante diz respeito a seu sistema de refrigeração. Neste modelo, os circuitos de refrigeração do bico e do corpo se comunicam por uma ligação em série, permitindo que a tocha seja refrigerada por apenas uma unidade de refrigeração. Tal característica reduz o equipamento necessário para a realização da soldagem fora de posição, fazendo com que esta tocha seja o modelo mais indicado para a aplicação do processo PTA-P na recuperação das turbinas hidráulicas.



(a)



(b)

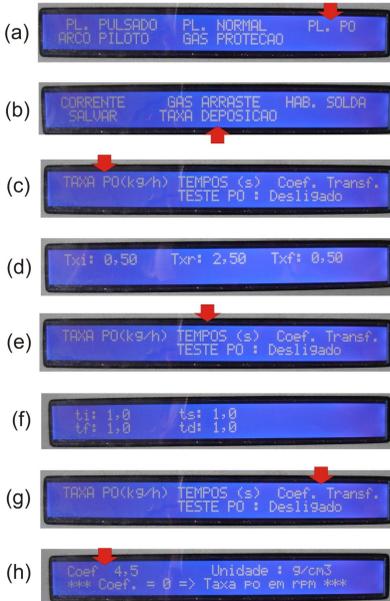
Figura 5.8 – Tochas de soldagem PTA-P envolvidas nas experiências: a) tocha PLP 300; b) Tocha PTA-P do LABSOLDA

5.2.2 Controle do ADP VR-F pela Fonte DigiPlus A7

Como relatado anteriormente, o software da Fonte DigiPlus A7 permite também o controle em malha aberta do alimentador de pó, já que integra um controlador e o *dirver* STR8. Na verdade, esta função do programa possui características exclusivas para o controle do ADP VR-F, ou seja, permite a regulagem direta da taxa mássica (em kg/h), como mostrado na sequência 1 da Figura 5.9. Também viabiliza, conforme ilustra a sequência 2 da Figura 5.9, o controle do ADP em função da

rotação (em rpm) da Válvula Rotativa, propiciando a realização de calibrações ou controle de outros alimentadores, quando necessário.

sequência 1



sequência 2

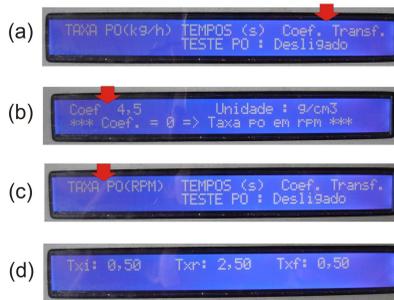


Figura 5.9 – Sequência de telas de controle do ADP VR-F (setas indicam a função selecionada): sequência 1 – configuração da taxa mássica; sequência 2 – configuração de rotação

Na sequência 1, a escolha de operação com o processo PTA-P na Fonte DigiPlus A7 aparece como Plasma Pó entre outras opções de soldagem plasma (item (a)). Juntamente com outras variáveis (inclusive a configuração de gás de arraste), é disponibilizada a regulação da TAXA DEPOSIÇÃO (na realidade, taxa de alimentação), no item (b).

Contando com as propriedades de dosagem volumétrica do ADP VR-F, a variável TAXA PO (item (c)), correspondente à taxa mássica de alimentação, pode ser diretamente configurada pelo usuário, juntamente com valores mássicos iniciais e finais da rampa (item (d)). Voltando a função TAXA DEPOSIÇÃO, podem ser regulados, na função TEMPOS (item (e)), a duração das taxas de início, regime e fim (item (f)). Entretanto, o operador deve conhecer previamente a densidade aparente do material que será usado, dado que pode ser inserido no software pela

opção Coef. Transf (item (g)). Selecionando esta opção, o valor pode ser inserido (item (h)).

De acordo com a sequência 2, dentro da função TAXA DEPOSIÇÃO (item (a)), aparece a informação de que, se Coef. Transf. receber valor igual a zero, o valor TAXA PO é convertido para rpm (item (b)), referindo-se à rotação do Rotor da Válvula Rotativa (ou do eixo do redutor). De fato, ao se retornar desta tela, a variável TAXA PO é relacionada à unidade rpm (item (c)) e todos os valores desta função assumem esta unidade (item (d)). Desta forma, a fonte permite a calibração da dosagem volumétrica do ADP VR-F e o controle de outros alimentadores, quando necessário.

5.2.3 Determinação das Características Geométricas dos Revestimentos

A realização da análise geométrica das soldas pode ser feita pelo método ilustrado na Figura 5.10.

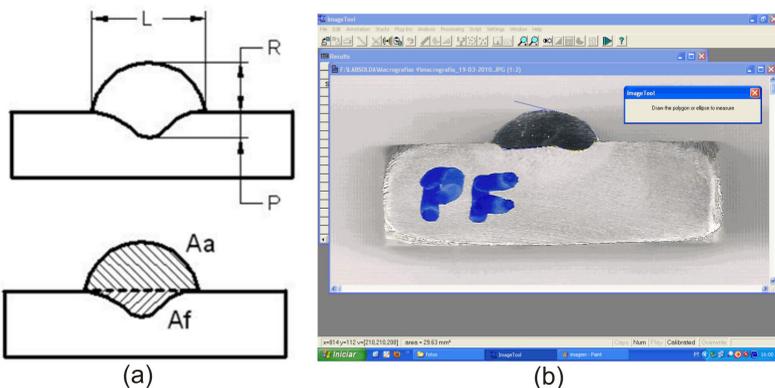


Figura 5.10 – Processo de análise geométrica dos cordões: a) dimensões do depósito e delimitação das áreas; b) tela do *software* de medição, Silva [6]

Após o corte transversal dos depósitos e posterior ataque químico adequado (Figura 5.10 (a)), é extraída uma imagem. Esta fornece a visualização da Largura (L), Reforço (R) e Penetração Máxima (P). A Diluição (Dil), grandeza referente à proporção da mistura entre o material consumível e o metal de base, pode ser extraída medindo-se as

áreas da área adicionada (Aa) e da área fundida (Af) (Figura 5.10 (a)), aplicando-se a Equação 5.2.

$$Dil = \frac{Af}{Aa + Af} \cdot 100 \quad (5.2)$$

As dimensões citadas podem ser medidas ao se transpor a imagem em um *software* dotado das devidas ferramentas (Image Tool 3.0®), cuja tela é ilustrada na Figura 5.10 (b).

5.2.4 Comparação Entre ADP VR-F e ADP de Tambor na Alimentação de Pós Alternativos

Como já comentado no Capítulo 3, o ADP de Tambor conseguiu, com alguma dificuldade, processar o pó de Bronze Pré-Ligado e um Inox 316L, chamado neste trabalho de Inox 316L-90, com faixa granulométrica de +40-90 μm . As propriedades de escoamento destes materiais causavam oscilações na pilha de pó formada no *gap* durante o giro do tambor, resultando em perturbações cíclicas no jato expelido pela linha pneumática.

Mesmo assim, foi possível realizar soldas na posição plana e comparar o desempenho do ADP VR-F com o do ADP de Tambor na manipulação desses materiais, como mostrado na Figura 5.11. Nos testes, foram realizadas soldas com os mesmos parâmetros, empregando velocidades de soldagem que variaram entre 10 a 50 cm/min.

É possível constatar, observando a Figura 5.11, que o ADP VR-F conferiu melhor qualidade na alimentação das soldas para os dois materiais, pois os cordões realizados com este apresentaram aspecto superficial isentos de ondulações em todas as velocidades testadas.

As soldas com o ADP de Tambor refletiram os problemas da manipulação dos pós em forma de ondulações na superfície dos depósitos, efeito semelhante ao de uma corrente pulsada. Os defeitos na alimentação se pronunciam mais à medida que a velocidade de soldagem é acrescida, pois os pulsos de pó são enviados à poça de fusão em distâncias cada vez maiores. Por isso, os dois primeiros cordões apresentaram características atenuadas deste fenômeno.

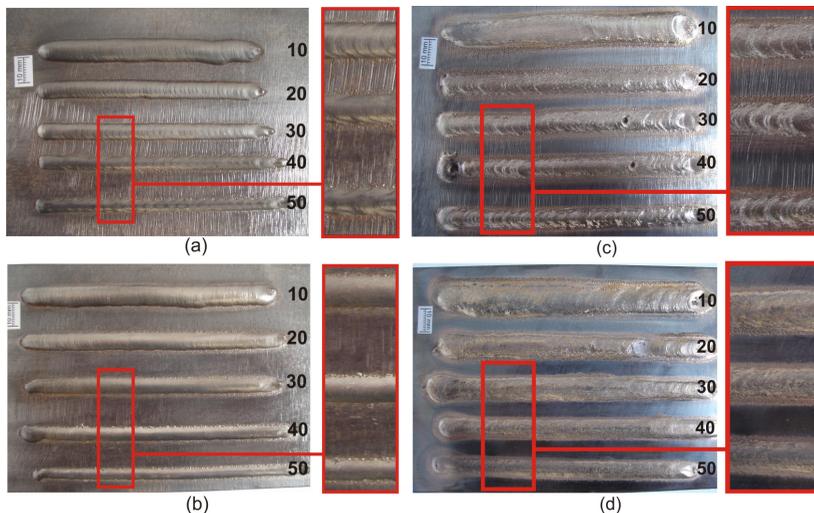


Figura 5.11 – Comparação de desempenho na alimentação de pós alternativos (números indicando a velocidade de soldagem): a) Inox 316L-90 alimentado com ADP de Tambor; b) Inox 316L-90 alimentado com VR-F; c) Bronze alimentado com ADP de Tambor; d) Bronze alimentado com VR-F

5.2.5. Contribuições no Desenvolvimento da Liga Resistente à Cavitação

Antes que o ADP VR-F fosse fabricado foram iniciadas atividades em busca da liga resistente à cavitação, empreendidas pela equipe de pesquisas metalúrgicas do LABSOLDA. Para a realização dos primeiros depósitos foi usado o ADP de Tambor sujeito, na ocasião, a operar com uma liga FeCrMn, atomizada com água, designada pelo código BRTS.

Segundo Fayal [43], este ADP enfrentou sérias dificuldades para manipular tal material, em função de suas características de escoamento. O pó era dosado e transportado de forma deficiente, gerando depósitos com poros, vazios e aspecto superficial ruim. Eram também frequentes os entupimentos e, além disso, foi observada a magnetização do material no Tubo de Queda. A Figura 5.12 ilustra este fenômeno, juntamente com os aspectos do pó utilizado e do depósito obtido. O revestimento resultante não viabilizou a extração de um corpo de prova apto para análise de desempenho da liga contra a cavitação.

Logo que o ADP VR-F foi disponibilizado, foi adotado na repetição das soldas realizadas anteriormente com o ADP de Tambor. De acordo com os relatos de Fayal [43], o ADP VR-F não apresentou problemas ao manipular o pó. Fornecia um jato de partículas constante e não houve nenhum caso de entupimento de seus canais internos. O sucesso no processamento deste material permitiu a produção de depósitos de qualidade muito superior aos obtidos com o ADP de Tambor, como se pode constatar na Figura 5.13. Deste revestimento foi possível a extração de um corpo de prova, chamado CP 01A, para análise do desempenho da liga frente ao fenômeno da cavitação. No entanto o corpo de prova apresentou poros e vazios, que prejudicaram a resistência da liga frente ao fenômeno da cavitação.

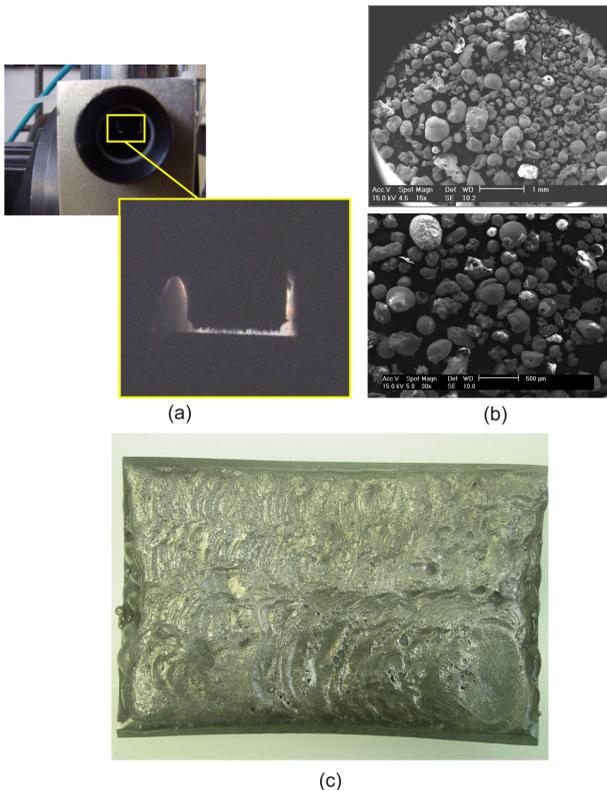


Figura 5.12 – Operações de soldagem envolvendo o pó BRTS e o ADP de Tambor, Fayal [43]: a) fenômeno da magnetização do pó na extremidade do tubo de queda; b) características do pó atomizado a água; c) aspecto superficial do revestimento

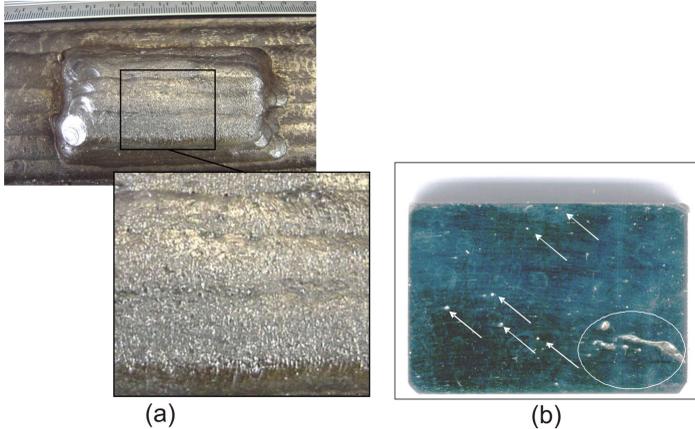


Figura 5.13 – Revestimento produzido com o ADP VR-F usando o pó BRTS, Fayal [43]: a) revestimento com detalhe da superfície; b) CP 01A com poros indicados pelas setas e vazios dentro do círculo

Contudo, a qualidade de alimentação conferida pelo ADP VR-F permitiu a Fayal [44] explorar parâmetros que viabilizaram um novo revestimento, apresentado na Figura 5.14. Dele foi retirado o CP 01B, com menor incidência de poros e sem vazios.

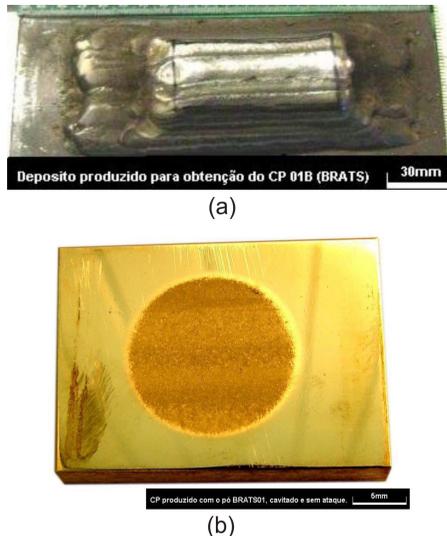


Figura 5.14 – Novo revestimento produzido com o ADP VR-F usando o pó BRTS, Fayal [44]: a) aspecto do revestimento; b) CP 01B após ensaio de cavitação

5.2.6 Deposição Sobre-Cabeça da Mistura Experimental Stenox

O desempenho do ADP VR-F no envio de consumíveis a soldas sobre-cabeça foi verificado por Alves [45], que o submeteu a operação com uma mistura experimental para aplicação em tal posição.

A mistura, chamada Stenox, foi formulada com objetivo de caracterizar propriedades mecânicas do material resultante (entre elas a resistência à cavitação). A mistura é constituída por 17% de uma liga à base de cobalto e 83% de Inox 316L. As atividades são relatadas a seguir, nas quais foram utilizados os parâmetros e variáveis relacionados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Variáveis e parâmetros adotados para a soldagem da mistura Stenox.

Parâmetros e Variáveis	Valores	Unidades
Corrente de Soldagem	150	A
Amplitude	10,0	mm
Frequência	0,7	Hz
Velocidade de Soldagem	8,0	cm/min
Vazão de Gás Plasma	2,0	l/min
Vazão Gás de Proteção	15,0	l/min
Distância Bico-Peça	10,0	mm
Recuo do Eletrodo	2,5	mm
Orifício Constritor	4,0	mm
Diâmetro do Eletrodo	4,0	mm
Ângulo de Alimentação	75	grau
Taxa de Alimentação	1,1	kg/h

Para as atividades foi adotada a tocha PLP 300. Originalmente esta tocha possui uma mangueira de poliuretano de 3,5 mm de diâmetro interno, o que exigiu o emprego de uma vazão de gás de arraste de 5 l/min. Foram realizados no total 18 cordões, formando um revestimento composto por duas camadas de 9 cordões cada uma. Na Figura 5.15 pode se observar que os cordões se assemelham no aspecto da superfície e largura, indicando bom desempenho do ADP VR-F.

Como mostrado na Figura 5.15, uma vazão de 5 l/min trouxe danos ao revestimento. No item (a) desta figura, o detalhe da região de sobreposição passa impressão de que as laterais dos cordões não

penetram na camada de baixo e retratam bem o movimento da tocha. A macrografia, detalhada no item (b), acusa a falta de penetração da região lateral de um dos cordões da primeira camada. O item (c), por sua vez, revela que o corpo de prova extraído do revestimento apresenta falhas alinhadas que coincidem com a região de sobreposição dos cordões. Por fim, este corpo de prova mostrou-se inválido para representar o desempenho do material frente ao fenômeno da cavitação.

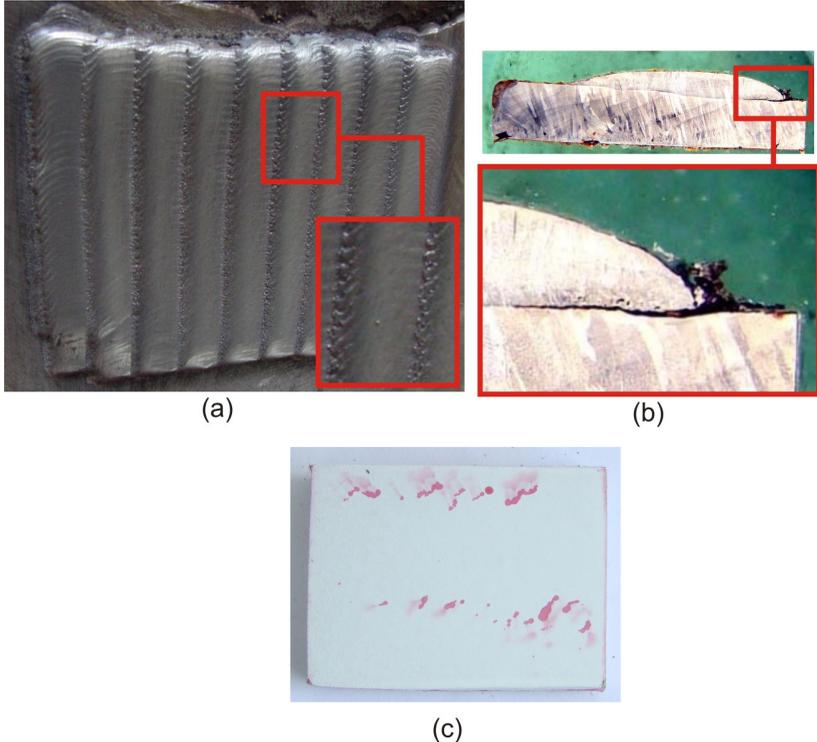


Figura 5.15 – Revestimento com Stenox empregando 5 l/min: a) aspecto superficial do revestimento; b) macrografia de um dos cordões da primeira camada; c) aspecto do corpo de prova para teste de cavitação após ensaio de líquidos penetrantes

Na segunda tentativa de deposição da mistura Stenox foi utilizada a tocha PLP 300, porém nela foi instalada uma mangueira de poliuretano com 2,0 mm de diâmetro interno. Com esta mangueira, foi possível transportar o consumível empregando uma vazão de gás de arraste de 2,5 l/min.

Analisando a Figura 5.16 pode-se constatar que a redução da vazão de gás de arraste eliminou os defeitos anteriormente apresentados. No item (a), o aspecto da superfície do revestimento aparenta cordões mais “molhados”. No item (b), ilustração 3, pode se observar baixa (porém sem falhas) penetração dos cordões da primeira camada, cuja Diluição ficou em torno de 5%. No mesmo item, ilustração 2, pode-se constatar a isenção de falhas no corpo de prova preparado para o teste de cavitação e o aspecto deste após o ensaio (ilustração 1).

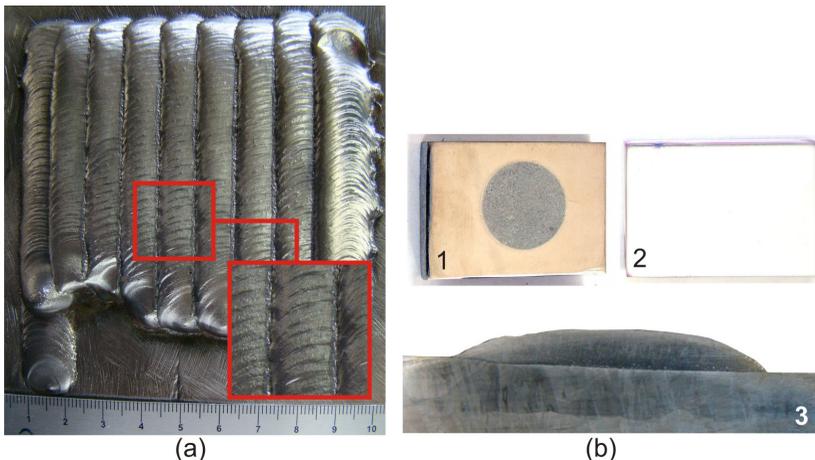


Figura 5.16 - Revestimento com Stenox empregando 2,5 l/min: a) aspecto superficial do revestimento; b) corpo de prova sujeito a ensaio de cavitação em 1; corpo de prova sujeito a ensaio de líquidos penetrantes em 2; macrografia de um dos cordões da primeira camada

Embora os ensaios de deposição da mistura Stenox não tenham focado o cálculo do aproveitamento de material, durante a soldagem, foi possível observar que, com maior vazão de gás de arraste, há maior incidência de fagulhas (que parecem ser arremessadas a maiores distâncias). Tal fenômeno pode ser observado na Figura 5.17. Acredita-se que os depósitos Stenox realizados com menores vazões de gás, além de não apresentarem defeitos entre os cordões, podem ter absorvido maior quantidade do material enviado.



(a) (b)
Figura 5.17 – Imagens da soldagem da mistura Stenox: a) deposição com 5,0 l/min; b) deposição com 2,5 l/min

5.2.7 Soldagem em Parede Vertical

Foram realizadas operações de soldagem com o intuito de desenvolver um procedimento para revestir paredes de caldeiras de usinas termelétricas. O material selecionado para o recobrimento foi o Inox 316L. As características de revestimento desejadas eram reforço em torno de 2 mm e diluição de aproximadamente 5%, com maior velocidade de soldagem possível.

Dentro desta aplicação julgou-se fundamental caracterizar, além dos aspectos geométricos do recobrimento, o rendimento de deposição do consumível aplicado. Sendo assim, aproveitou-se para realizar soldas comparativas entre o ADP VR-F e o ADP de Tambor uma vez que, tratando-se de um consumível tradicional, este último é capaz de alimentá-lo. Contudo, para soldar com o ADP VR-F, foi necessário instalar a mangueira de poliuretano (com 2,0 mm de diâmetro interno) na tocha PLP 300.

No processo em que foi empregado o ADP de Tambor foi necessário utilizar vazão de gás de arraste de 5 l/min. Já com o ADP VR-F a vazão de gás de arraste adotada foi de 2,5 l/min. Outros parâmetros e variáveis de soldagem estão relacionados na Tabela 5.4. Imagens extraídas durante os procedimentos com os ADP's podem ser conferidas na Figura 5.18.

Tabela 5.4 – Principais variáveis e parâmetros de soldagem.

Variáveis	Valores	Unidades
Corrente	120	A
Taxa Alimentação	0,6	kg/h
Velocidade Soldagem	30	cm/min
DBP	8	mm
Vazão Gás Plasma	2	l/min
Vazão Gás Proteção	12	l/min
Tempo de Soldagem	7,5	min
Orifício Constritor	3,2	mm



Figura 5.18 – Soldagem em parede vertical: a) soldagem com ADP VR-F empregando 2,5 l/min; b) soldagem com ADP de Tambor empregando 5,0 l/min

Os revestimentos produzidos com o uso dos dois alimentadores são apresentados nas figuras 5.19 e 5.20. Ambos conferiram características superficiais semelhantes, produzindo revestimentos compostos por cordões contínuos, sem vestígios de falhas na alimentação. As diferenças estão relacionadas com a vazão do gás de arraste empregada.

Os detalhes das superfícies dos revestimentos, mostrados nas ilustrações das figuras 5.19 (c) e 5.20 (c), permitem concluir que há incidência maior de pó não fundido nas zonas de sobreposição dos cordões no revestimento produzido com o ADP de Tambor.

O problema de falta de penetração nas regiões de sobreposição ocorreu no revestimento produzido com vazão de gás de arraste de 5 l/min. No item (d) da Figura 5.19, é possível observar a incidência deste fenômeno em algumas regiões do revestimento confeccionado com o ADP de Tambor, revelados por ensaio de líquidos penetrantes.

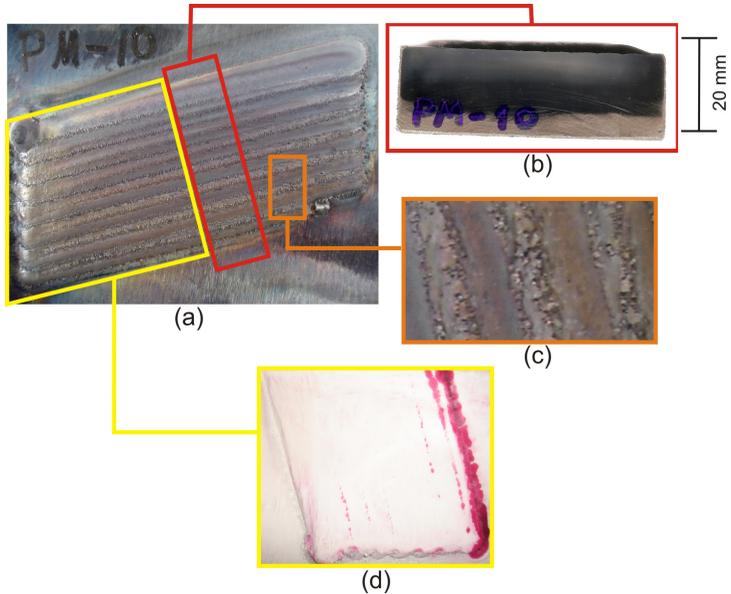


Figura 5.19 – Revestimento produzido com ADP de Tambor: a) região revestida; b) macrografia; c) detalhe superficial do revestimento; d) superfície sujeita a ensaio de líquidos penetrantes

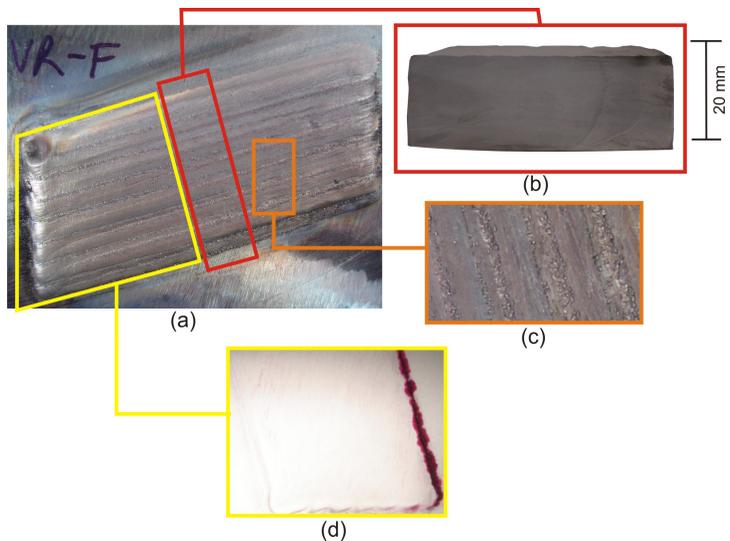


Figura 5.20 – Revestimento produzido com ADP VR-F: a) região revestida; b) macrografia; c) detalhe superficial do revestimento; d) superfície sujeita a ensaio de líquidos penetrantes

As chapas foram pesadas antes e depois das soldas para se conhecer a massa dos revestimentos e o tempo de arco aberto foi cronometrado. A Tabela 5.5 apresenta os dados coletados e processados.

Tabela 5.5 – Principais características das soldas produzidas.

ADP	VR-F	PM-10
Massa Inicial (g)	2315,3	2277,10
Massa Final (g)	2483,65	2336,80
Desperdício (g)	7,27	14,17
Rend. Deposição (%)	90,2	80,82
Reforço (mm)	2,10	1,73
Penetração Max. (mm)	0,49	0,44
Diluição (%)	10,37	14,47

De acordo com os dados expostos na Tabela 5.5 foi constatado, em concordância com a literatura, que o rendimento de deposição foi reduzido com o aumento da vazão de gás de arraste, pois o desperdício soldando-se com 2,5 l/min não chegou a 10%, enquanto no revestimento realizado com 5 l/min as perdas foram de quase 20%. Na Figura 5.18 é possível observar maior quantidade de fagulhas dispersando-se para fora da região de soldagem, no processo que emprega maior vazão de gás. De fato, este fenômeno sinaliza desperdício maior de consumível.

Quanto à diluição, esta foi maior no revestimento realizado com o ADP de Tambor, embora o revestimento produzido com o VR-F tenha apresentado maior penetração máxima. A altura do reforço também foi reduzida pelo emprego da vazão exagerada de gás de arraste.

Por fim, uma vazão abusiva de gás é prejudicial para os revestimentos produzidos por PTA-P, pois pode provocar, além das falhas de penetração entre os cordões, desperdício considerável de material consumível (e também de gás) e a modificação das propriedades do revestimento pelo maior grau de mistura deste com o substrato (maior diluição). Portanto, o ADP VR-F é mais indicado para esta operação, uma vez que permite a redução do diâmetro interno da mangueira e promove a realização de soldas com menores vazões de gás de arraste.

5.2.8 Soldagem PTA-P nas Turbinas Hidráulicas

As últimas atividades de avaliação do ADP VR-F foram realizadas em campo. Houve a oportunidade de aplicar o processo PTA-P em uma turbina hidráulica danificada por cavitação, durante o período de seu recondição. As atividades de soldagem foram planejadas estrategicamente, não com o compromisso de restaurar as pás, mas sim a título de avaliação dos equipamentos, procedimentos e das ligas anti-cavitação desenvolvidas em laboratório.

Os equipamentos empregados foram, basicamente, a fonte DigiPlus A7, uma UR2, a tocha PTA-P do LABSOLDA e o ADP VR-F.

5.2.8.1 Instalação dos Equipamentos

O espaço interior da turbina é pequeno e restrito à circulação do pessoal envolvido na manutenção (soldadores, inspetores, técnicos, engenheiros e visitantes), o que inviabiliza a instalação de todos os equipamentos no local de trabalho. Assim, a distribuição espacial dos componentes necessários à soldagem deu-se de acordo com a Figura 5.21.

Na Figura 5.21 (a) pode-se observar que a DigiPlus foi acomodada fora da turbina, em um local distante (aproximadamente 20 m da área a ser revestida), juntamente com a UR2 e os cilindros de argônio.

Próximos ao local de serviço ficaram o ADP VR-F, a tocha de soldagem e uma IHM Remota, evitando o deslocamento dos operadores até a fonte de soldagem para regulagem das variáveis (Figura 5.21 (c)). Estes eram conectados à fonte e à refrigeração por uma longa extensão (Figura 5.21 (b)), composta por todo cabeamento necessário ao funcionamento dos componentes do interior da turbina.

O ADP foi instalado próximo ao local de trabalho para manter a distância entre este e a tocha em 2,5 m garantindo, assim, boas condições ao transporte dos consumíveis. Para sua fixação não foi empregado o pedestal, pois este não concedia a rigidez e segurança apropriada para a utilização do equipamento em campo. Portanto, foi instalada (parafusado) no Fixador Superior do Flange do Motor da Válvula Rotativa, uma chapa em “L” de aproximadamente 5 mm de espessura. A extremidade livre foi encaixada, como mostrado no detalhe

da Figura 5.21 (c), a um orifício do corrimão dos andaimes próximo à região de soldagem.

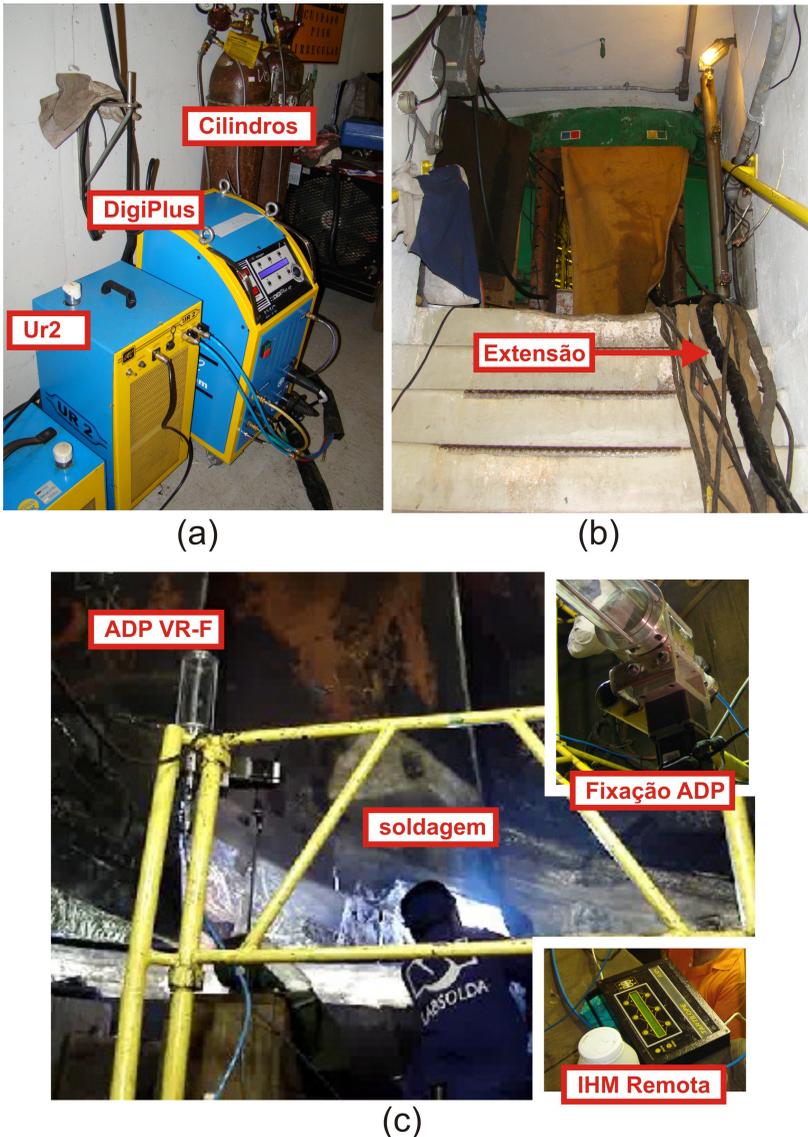


Figura 5.21 – Instalação dos equipamentos para aplicação do processo PTA-P na Turbina 4: a) equipamentos fora da turbina; b) percurso da extensão na entrada da turbina; c) equipamentos no interior da turbina

Foram selecionados cinco materiais para serem aplicados na pá da turbina, todos produzidos por atomização (partículas esféricas). Dois deles, designados como COG 150 e BRTS, foram desenvolvidos no LABSOLDA durante o projeto. Possuem composição semelhante entre si (à base de Fe-Cr-Mn), sendo que o pó BRTS foi produzido por atomização à água. Os outros três consistem em ligas comerciais: o Stellite 6®, o Inox 316L e o Cavitec® atomizadas.

5.2.8.2 Resultados

As atividades se estenderam por quatro dias. Alguns aspectos que refletem o bom desempenho do ADP VR-F na soldagem da turbina são ilustrados pela Figura 5.22. Foi realizada uma checagem geral do funcionamento do sistema. Constatou-se que o material estava escoando normalmente pelo Silo (Figura 5.22 (a)) e houve a formação de um leito estável de partículas dentro do Fluidizador (Figura 5.22 (b)). A boa qualidade da alimentação pode ser confirmada pela observação dos jatos de pó, lançados de forma robusta para fora dos orifícios de alimentação do bico da tocha Figura 5.22 (c), sendo esta a tocha PTA-P do LABSOLDA. Após a confirmação do bom funcionamento do ADP, foram iniciadas as operações de soldagem Figura 5.22 (d). As condições de alimentação contribuíram com a técnica do soldador, que facilmente conseguia realizar depósitos de qualidade.

Os parâmetros de soldagem determinados em laboratório para os materiais selecionados não se mostraram adequados à deposição destes na pá da turbina. Em virtude disto foram explorados novos parâmetros para a corrente (até 200 A constante) e taxa de alimentação de pó, variando entre 0,7 e 1,5 kg/h. A vazão de gás de arraste empregada foi de 3,0 l/min, valor estabelecido por preferência do soldador.

Durante a deposição dos materiais o soldador necessitava efetuar equalizações da vazão dos consumíveis (ajuste fino), para produzir cordões com as qualidades por ele desejadas. Tais ajustes foram permitidos pelo ADP VR-F, pois se refletiam rapidamente nas propriedades das soldas.

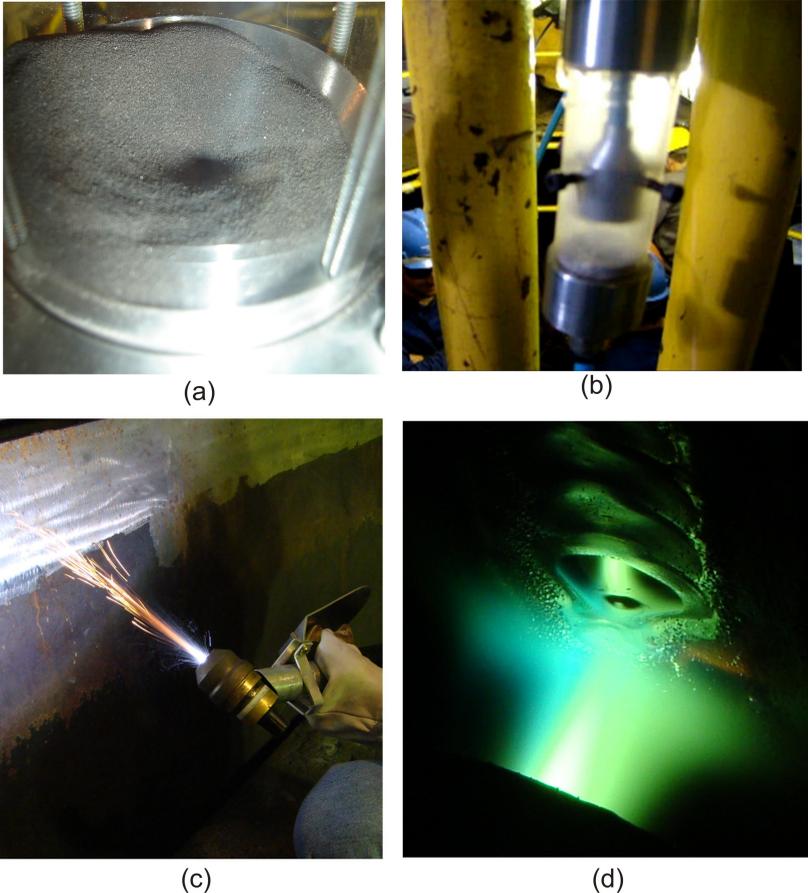


Figura 5.22 – Características de alimentação em campo: a) pó BRTS escoando no Silo; b) leito de partículas estabilizado no Fluidizador; c) jatos de pó BRTS expelidos pelo bico da tocha; d) consumível sendo lançado à poça de fusão (pá da turbina)

A boa qualidade de alimentação promovida pelo ADP VR-F se refletiu nos depósitos realizados com os pós selecionados. No entanto, embora a maioria dos depósitos apresente bom aspecto superficial, somente os revestimentos de Inox 316L e de COG 150 mostraram-se aceitáveis, sendo os outros removidos da pá. O motivo da reprovação dos depósitos de Stellite 6 e Cavitec baseou-se na ocorrência de trincas ao longo da área revestida. Já reprovação do depósito produzido com o pó BRTS deu-se devido à má soldabilidade deste material na posição

sobre-cabeça. A formação de escória sobre os cordões prejudicava a técnica do soldador e a solidificação do material (deformando a superfície dos cordões). As figuras 5.23, 5.24, 5.25, 5.26 e 5.27 apresentam imagens dos revestimentos produzidos com os materiais.



Figura 5.23 – Depósito de Stellite 6 com 2 camadas



Figura 5.24 – Depósito de Inox 316L com 2 camadas

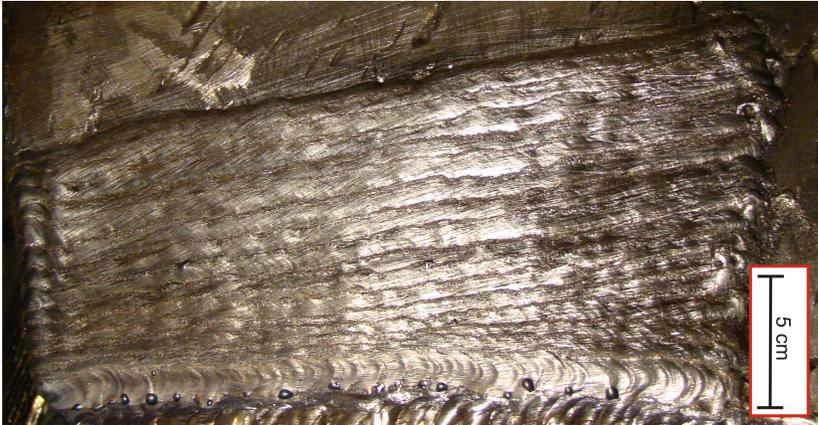


Figura 5.25 – Depósito de COG 150 com 3 camadas



Figura 5.26 – Depósito de Cavitec Pó com 2 camadas

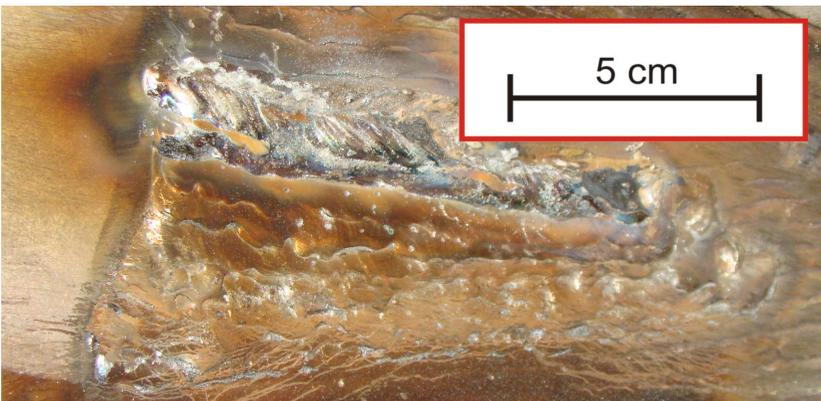


Figura 5.27 – Depósito de pó BRTS com 1 camada

5.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os testes a que o ADP VR-F foi submetido refletiram a capacidade operacional do equipamento, tanto na manipulação e dosagem de materiais tradicionais e alternativos, como no envio de consumíveis em oposição à gravidade (visando aplicação do processo PTA-P fora de posição).

Quanto à diferença obtida entre o Volume Efetivo e o Volume Nominal de dosagem nos testes de repetitividade, acredita-se que se deva a deformação da manta de silicone. A pressão exercida pelo material confinado pode provocar a deformação da manta, aumentando as dimensões do volume de dosagem. Outro fenômeno que pode ter contribuído com a diferença, embora não possa ser observado, é o arraste de partículas contidas entre a manta e o Rotor (fora das cavidades), capturadas pelo seu próprio movimento de rotação. No *software* de controle do ADP VR-F, abordado no Capítulo 4, V_n deve ser corrigido (tanto no Gabinete como na fonte de soldagem), substituindo-o pelo valor de V_{ef} encontrado.

Os testes de repetitividade também acusaram dificuldade pouco maior na manipulação dos pós alternativos pelo ADP VR-F. De fato, como estes materiais apresentam escoamento mais irregular, pode ocorrer que as Cavidades do Rotor sejam preenchidas de maneira desuniforme durante a operação, se refletindo nos valores mais altos de desvio-padrão apresentados na Tabela 5.2. Nesta tabela, também mostra que o volume de dosagem tendeu a ser mais baixo para os pós alternativos. Acredita-se que estes, por possuírem menor densidade aparente, conseguem se reorganizar dentro das cavidades e, com isso, exercem menor pressão sobre a manta durante a manipulação.

Os fenômenos comentados anteriormente também se fizeram presentes nos testes de linearidade. Na Figura 5.5, pode-se observar que as curvas dos materiais alternativos apresentam mais oscilações (concordantes com o maior desvio-padrão da dosagem). Também nesta figura observa-se uma tênue deflexão à medida que a velocidade do Rotor aumenta, o que se relaciona com a pequena redução do volume de dosagem para estes materiais.

Os ensaios de soldagem transpareceram o desempenho do ADP VR-F com relação à soldagem fora de posição e manipulação de diferentes tipos de pós. Ao comparar seu desempenho com o do ADP de Tambor na alimentação de soldas com pós alternativos, foi possível alimentar soldas produzidas com maiores velocidades de soldagem sem

se obter marcas nos depósitos. Assim, além de possibilitar a produção de depósitos de qualidade com estes pós, pode contribuir para o aumento da produtividade da soldagem PTA-P.

O desempenho satisfatório do ADP VR-F na manipulação da mistura Brts levou a equipe de metalurgia da soldagem do LABSOLDA a adotar este equipamento para a realização dos experimentos subsequentes e, a partir de então, tem sido usado no desenvolvimento de uma liga de alta resistência à cavitação. Mesmo que estejam sendo empregadas misturas experimentais atomizadas (manipuláveis por outros alimentadores), a adoção do equipamento para a bancada padrão foi mantida. Desta forma as condições de alimentação podem ser mantidas, o que contribui para o estudo das propriedades dos materiais depositados. Além disto, há liberdade de adicionar pós de diferentes naturezas às misturas já formuladas, ou mesmo depositar novas misturas compostas por pós alternativos sem necessidade de troca de equipamento.

A utilização de uma mangueira de menor diâmetro, proporcionada pelo ADP VR-F, permitiu a realização de soldas PTA-P de qualidade fora de posição. As vazões de gás de arraste puderam ser mantidas nos níveis normais, evitando os defeitos de falta de penetração das soldas nas regiões laterais dos cordões. Além de evitar os referidos defeitos, a manutenção dos níveis de vazão de gás de arraste em 2,5 l/min reduziu consideravelmente o desperdício dos consumíveis de solda. Como consequência do melhor aproveitamento de material, foram obtidas soldas com maior volume de reforço e menores níveis de diluição.

As propriedades de alimentação conferidas pelo ADP VR-F garantiram a aplicação do processo PTA-P em campo com economia e qualidade. Com relação à alimentação de pó, não houve problemas de falta de penetração nas regiões de sobreposição dos cordões que formam os revestimentos. Além disto, pode-se esperar maior conservação das propriedades das ligas aplicadas nas pás das turbinas, em relação a um procedimento que emprega altas vazões de gás de arraste.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados pelo ADP VR-F frente aos testes aos quais foi submetido, pode-se dizer que o sistema desenvolvido representa um avanço em tecnologia de alimentação de pó para o processo PTA-P.

As operações de soldagem PTA-P fora de posição, realizadas neste trabalho, transpareceram os problemas já apontados na literatura por Díaz [7,8] e Huang [11]. Viu-se que o emprego de vazões de gás de arraste muito superiores a 2,0 l/min (em torno de 5,0 l/min) contribuem para o desperdício de consumível e para a ocorrência de falta de fusão e de penetração nas regiões laterais dos cordões. Porém, o Fluidizador proporcionou ao ADP VR-F a alimentação de consumível com vazões compatíveis com os níveis normais (2,5 e 3,0 l/min), pois permitiu transporte com qualidade do material através de uma mangueira mais fina (aumentando a velocidade das partículas sem o acréscimo da vazão). Assim, os problemas anteriormente citados, ocorridos tanto na deposição da mistura Stenox (item 5.2.6) como na soldagem em parede vertical (item 5.2.7), foram evitados.

O ADP VR-F também apresentou o desempenho esperado na manipulação de materiais tradicionais e alternativos. A Válvula Rotativa conseguiu operar com pós de características extremamente discordantes dos padrões do PTA-P. Este fato fica claro na observação da saída dos materiais na extremidade da linha de transporte pneumático. Também foi notável na realização de procedimentos de soldagem comparativos entre o ADP de Tambor e o ADP VR-F (item 5.2.4). Na alimentação de material nos depósitos confeccionados com o ADP VR-F não foram visíveis perturbações, mesmo com o aumento da velocidade de soldagem. Sua eficiência na alimentação de pós alternativos foi essencial para a pesquisa da liga resistente à cavitação (item 5.2.5). Mostrou-se ser o único alimentador disponível capaz de manipular um dos materiais pesquisados, viabilizando a produção de depósitos de qualidade para a extração dos corpos de prova necessários às análises de resistência à cavitação.

As características de dosagem da Válvula Rotativa, levantadas por meio dos testes de repetitividade e de linearidade (item 5.1), revelaram baixa influência das propriedades morfológicas e granulométricas dos pós no volume de dosagem do mecanismo. Esta propriedade torna válido o método adotado para o controle do ADP VR-F, ou seja, o acionamento por motor de passo mostrou-se adequado para

a aplicação. Sendo assim, o equipamento realmente permite a regulagem da taxa mássica (além da regulagem direta da rotação) em sua interface, necessitando apenas do dado da densidade aparente do material utilizado.

As atividades realizadas em campo foram beneficiadas pela praticidade que o ADP VR-F propicia na regulagem da taxa de alimentação desejada, além da boa qualidade no envio dos consumíveis para soldagem fora de posição. Por exemplo, na soldagem das turbinas, caso fossem empregados os outros alimentadores disponíveis, seriam necessárias calibrações constantes para se conhecer a taxa de alimentação e variá-la de acordo com os outros parâmetros. Ao invés disto, a taxa mássica foi regulada e controlada diretamente pela fonte, permitindo a realização de procedimentos de caráter industrial para a soldagem no interior das turbinas. A liberdade na posição de instalação também contribui para as atividades de campo, pois reduz os riscos de utilização indevida do equipamento e favorece a recarga do Silo. Por outro aspecto, mesmo que a soldagem de um pó alternativo nas turbinas não tenha sido bem sucedida, a aceitação deste tipo de materiais por parte do ADP VR-F favorece futuras aplicações de ligas experimentais nas próprias pás. Tal fato assegura a continuidade das pesquisas em campo, contribuindo para o desenvolvimento da liga resistente à cavitação e de seu procedimento de deposição.

Por fim, a realização deste trabalho não só viabilizou o desenvolvimento de novas tecnologias para manutenção dos meios de produção de energia elétrica. Também representa uma contribuição à disponibilidade de recursos tecnológicos nacionais, voltado para ampliação do conhecimento científico da soldagem PTA-P no Brasil, visto que o sistema desenvolvido permite a extensão do campo de aplicação deste processo, tanto no âmbito metalúrgico como processual. No campo da metalurgia, a praticidade que o processo PTA-P concede para o desenvolvimento de novos materiais foi intensificada com a concepção do ADP VR-F. Há aceitação de matéria prima cujo fornecimento é mais acessível (a nível nacional e internacional) e um melhor aproveitamento desta. Quanto ao próprio processo, a possibilidade de ampliar o campo de aplicação do PTA-P pode abrir novas opções para os métodos de fabricação e manutenção que exigem o revestimento de superfícies, como por exemplo, o revestimento de paredes de caldeiras, tubulações ou componentes que, por alguma razão, não podem ser posicionados para dar condições ao processo.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O desempenho satisfatório do ADP VR-F na alimentação de soldas (tanto a favor como em oposição à gravidade) e na manipulação de materiais tradicionais e alternativos viabiliza novas frentes de pesquisa no processo PTA-P. Tanto o campo da metalurgia da soldagem como as técnicas e procedimentos podem ser beneficiados. Sendo assim, algumas sugestões para trabalhos futuros serão propostas a seguir:

- **Rendimento de deposição em função da posição de soldagem e faixa granulométrica:** com o ADP VR-F, podem ser realizadas experiências para avaliar a tendência ao desperdício de pó em diversas orientações espaciais da tocha de soldagem. Tais estudos podem ser repetidos para diversas faixas de distribuição granulométricas, buscando avaliar se há tendência ao desperdício em função do tamanho das partículas.
- **Deposição sobre superfícies não metálicas empregando o arco piloto:** a manipulação de pós metálicos de faixa granulométrica mais refinada facilita o emprego do arco piloto (não transferido) no revestimento de superfícies não metálicas. Estes necessitam de menores níveis de energia para fundir e favorecem o uso do arco piloto, única fonte de calor que pode ser empregada para o revestimento de superfícies não metálicas.
- **Estabelecer relações operacionais entre vazão de gás de arraste e faixa granulométrica:** de acordo com o diagrama de Geldart, as propriedades de fluidização dos materiais se modificam de acordo com a faixa granulométrica das partículas. Sendo assim, podem ser realizados estudos para indicar a faixa de vazão de gás mais apropriada a determinadas granulometrias.
- **Influência da morfologia das partículas na microestrutura dos depósitos:** sendo que partículas de diferentes formatos apresentam distintas propriedades de fusão, podem ser realizados estudos para caracterizar a influência das propriedades morfológica dos consumíveis nas propriedades microestruturais dos depósitos.
- **Relação entre energia de soldagem e faixa granulométrica:** realizar estudos para relacionar os efeitos de diversos níveis de corrente de soldagem na fusão de materiais de diferentes faixas granulométricas, determinando amplitudes e valores médios adequados para cada nível de corrente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3ª Edição. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>. Acesso em: Mar. 2010.
- [2] SILVA, R. H. G; DUTRA, J. C. **Thermal-pulsed MIG/MAG Welding Applied to the Repair of Cavitation Erosion on Large-scale Hydraulic Turbines**. *Welding and Cutting*, n. 1, p. 27-30. fev 2009.
- [3] MENON, R.; MOSIER, W.C. **Stainless Steel With Improved Weldability and Cavitation Resistance**. Article – Stoodly Company, Bowling Green, USA.
- [4] RAGU, D.; WEBBER, R. **PTA Proves its Worth in High Volume Hardfacing Job**. *Welding Journal*, v. 75, n. 2, p. 34-40. Miami, fev. 1996.
- [5] **Arcraft Plasma Website**. Disponível em: WWW.arcraftplasma.com. Acesso em 25 de mar. de 2009.
- [6] SILVA, R. H. G. **Inovações em Equipamentos e em Parametrização no Processo de Revestimento por Plasma-Pó (PTA-P)**. 2010. 263 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [7] DÍAZ, V. M. V. **Desempenho do Processo Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó na Posição Horizontal e Sobre-Cabeça**. In: Congresso Chileno de Ingeniería Mecánica COCIM 2004. Antofagasta, Chile, Agosto. 2004.
- [8] DÍAZ, V. M. V. **Inovação do Equipamento e Avaliação do Processo Plasma de Arco Transferido Alimentado Com Pó (PTAP) Para Soldagem Fora de Posição**. 2005. 198 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [9] 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.
- [10] DEUIS, R. L. et al. **Metal-matrix composite coatings by PTA surfacing**. *Composites Science and Technology*, v.58, n. 2, p. 299-309, 1998.
- [11] HUANG, X. et al. **Applications of PTA Powder Welding in Petroleum Chemical Industry**. *Proceedings of the 15th International Thermal Spray Conference*, p. 1013-1017. Nice, mai. 1998.
- [12] ASM HandBook. **Powder Metal Technology and Applications**. 9th ed. ASM International, 1998. Vol 7. p. 2762.

- [13] KLEIN, A. N. **Minicurso de Metalurgia do Pó e Materiais Sinterizados**. 110 f. Apostila. Departamento de Engenharia Mecânica. UFSC. Florianópolis.
- [14] MARCONI, M. **I Riporti duri con polveri saldate con il processo P.T.A. (Plasma ad Arco Trasferito)**. Livro Online (www.plasmateam.com), 320 p. 2002.
- [15] XIBAO, W.; HUA, L. **Metal Powder Thermal Behavior during the Plasma Transferred-arc Surfacing Process**. Surface and Coatings Technology, v. 106, n. 1-2, p. 156-161. ago. 1998.
- [16] PRESCOTT, J. K.; BARNUM, R. A. **On Powder Flowability**. Pharmaceutical Technology, p. 60-84. out. 2000.
- [17] SCHULZE, D. **Powders and Bulk Solids – Characterization, Storage and Flow**. Berlin Heidelberg, New York: Springer, 2008. p. 461.
- [18] MARINELLI, J.; CARLSON, J. W. **Solve Solids Flow Problems in Bins, Hoppers and Feeders**. Article - American Institute of chemical Engineers, 1992. p. 10.
- [19] Powder Technology Handbook. 3rd ed. Florida: Taylor & Francis Group, 2006. p. 855.
- [20] GIBILARO, L.G. **Fluidization Dynamics – The Formulation and Applications of a Predictive Theory for the Fluidized State**. 1st Ed. L’Aquila: Butterworth-Heinemann, 2001. p. 256.
- [21] CHASE, G. G. **Solids Notes**. Universidade de Akron. p. 5.1-5.11.
- [22] Leito de Jorro de Arroz: disponível em: <http://www.ufrnet.br>. Acesso em nov. 2008.
- [23] MARRETO, R. N. **Estudo da Técnica de Leito de Jorro Convencional para Secagem de Microcápsulas de Caseína e Pectina**. Tese (Doutorado em Ciências Farmacêuticas). 2006. 199 f. Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto.
- [24] 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.
- [25] DECHSIRI, C. **Particle Transport in Fluidized Beds**. 2004. 177 f. Tese (Doutorado) – Universidade de Groningen.
- [26] HandBook of Fluidization and Fluid-Particle Systems. New York: Marcel Dekker, 2003. p. 850.
- [27] McGlinchey, D. **Bulk Solids Handling – Equipment Selection and Operation**. Glasgow Caledonian University: Blackwell Publishing, 2008. p. 303.

- [28] PTA Powder Dispenser – Model 2500. Disponível em: <http://www.plasmateam.com>. Acesso em jun 2009.
- [29] Powder Feeder Model PGL-10. Catálogo disponível em: <http://www.alloysint.com.au>. Acesso em set 2009.
- [30] PTA Powder Feeders EP1 and EP2. Disponível em: WWW.castolin.com. Acesso em jun 2009.
- [31] CARVALHO, R. S. **Robô CNC para Automação da Soldagem MIG/MAG em Posições e Situações de Extrema Dificuldade**. 2009, 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [32] OWEN, P. J.; CLEARY, P. W. **Screw Conveyor Performance: Comparison of Discrete Element Modelling With Laboratoric Experiments**. 7th Internacional Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, Melbourne, 2009, p. 7.
- [33] BOHORQUEZ, C. E. N. **Relatório de Ensaios da Taxa de Alimentação de Pó**. Relatório Interno LABSOLDA, 8 p. Florianópolis, 26/06/2008.
- [34] **PM-10 Powder Feeder**. Disponível em WWW.plasma-master.com.ua. Acesso em fev. 2009.
- [35] **PM-10 Powder Feeder Operating Manual**. Plasma Master. 6 p.
- [36] 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.
- [37] Metal Powder Industries Federation. **Standard Test Methods for Metal Powders and Powder Metallurgy Products**. Princeton, 1998 Edition.
- [38] Manta de Silicone. Disponível em: www.electrosil.com.br. Acesso em out. 2009.
- [39] MILLS, D. **Pneumatic Conveying Design Guide**. 2nd Edition. Oxford. Butterworth-Heinemann, 2004. p. 650.
- [40] Manual Motor de Passo com Redução AK57H-3G20-1.8. Disponível em: www.akiyama.com.br. Acesso em abr. 2009.
- [41] Guia de Configuração do Driver STR4/8. Disponível em: www.applied-motion.com. Acesso em ago. 2010.
- [42] Manual Fonte DigiPlus A7. Disponível em: www.imc-soldagem.com.br. Acesso em nov. 2010.
- [43] FAYAL, R. S. **Avaliação de Pó Fe-Cr-Mn-Si-N Atomizado pela Brats – Parte 1**. Relatório Interno LABSOLDA, 12 p. Florianópolis, 26/04/2010.

[44] FAYAL, R. S. **Avaliação de Pó Fe-Cr-Mn-Si-N Atomizado pela Brats – Parte 2**. Relatório Interno LABSOLDA, 6 p. Florianópolis, 18/05/2010.

[45] ALVES, J. A. **Desenvolvimento de Equipamento e Procedimentos e Aplicação de uma Liga Experimental para PTA-P Sobre-Cabeça**. XXXVI Congresso Nacional de Soldagem – CONSOLDA, 2010, p. 10.