

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA CENTRO TECNOLÓGICO – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Jônathas Alexandre Alves

SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE CONSUMÍVEIS EM PÓ: DESENVOLVIMENTO DE DOSADOR E SENSOR PARA VAZÃO MÁSSICA

FLORIANÓPOLIS 2020 Jônathas Alexandre Alves

SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE CONSUMÍVEIS EM PÓ: DESENVOLVIMENTO DE DOSADOR E SENSOR PARA VAZÃO MÁSSICA

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Régis Henrique Gonçalves e Silva.

Coorientador: Prof. Dr. Mateus Barancelli Schwedersky.

Florianópolis 2020 Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Alves, Jônathas

Sistema de Alimentação de Consumíveis em Pó: Desenvolvimento de Dosador e Sensor para Vazão Mássica / Jônathas Alves ; orientador, Régis Henrique Gonçalves e Silva, coorientador, Mateus Barancelli Schwedersky, 2021. 207 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Engenharia Mecânica. 3. Alimentador de Consumíveis em Pó para Soldagem PTA-P. 4. Sensor de Fluxo Mássico de Metais em Pó. 5. Válvula de Controle Dinâmico de Fluxo de Pó. I. Silva, Régis Henrique Gonçalves e . II. Schwedersky, Mateus Barancelli. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título. Jônathas Alexandre Alves

Sistema de Alimentação de Consumíveis em Pó: Desenvolvimento de Dosador e Sensor para Vazão Mássica

O presente trabalho em nível de doutorado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof^a. Ana Sofia Clímaco M. d'Oliveira, Ph.D. Universidade Federal do Paraná – UFPR

Prof. Fábio Antônio Xavier, Dr. Eng. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

> Raul Gohr Júnior, Dr. Eng. IMC – Engenharia de Soldagem

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de doutor em Engenharia Mecânica.

Prof. Paulo de Tarso Rocha de Mendonça, Dr. Eng. Coordenador do Programa

Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng. Orientador

Florianópolis, 2020.

Aos meus pais, José e Maria de Lourdes; Aos meus irmãos Kátia, Kelly, Karen e José Antônio; À minha esposa Patrícia; À minha filha Matilda (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

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

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

Ao meu orientador prof. Dr. Régis, pelo exemplo de dedicação à docência e à pesquisa científica, pelas contribuições a este trabalho e transferência de conhecimentos ao longo de minha formação como pesquisador. Também ao meu coorientador prof. Dr. Mateus, pelo apoio a este trabalho e pelos conhecimentos compartilhados ao longo de minha jornada como pós-graduando.

Aos colegas da equipe do LABSOLDA que também muito ajudaram no desenvolvimento deste trabalho: Fernando Costenaro, Felippe Kalil, Cléber Marques, Rafael Horn, Luciano Cirino, Cléber Guedes, Alisson Fernandes, João Facco, Alberto Bonamigo, Kauê Riffel, Rafael Bernardi, Daniel Galeazzi, Júlia Dornelles, Rodrigo Machado, Júnior Bonetti, Gustavo Sousa, Rafael Barbosa, Luiz Paes e Marcelo Okuyama. Também para todos meus amigos que, de muitas formas, me inspiram e me aconselham ao longo da caminhada: Eduardo Bidese, Bruno Gevaerd, Gabriel Costa e Daniel Lucio.

O método científico é comprovado e verdadeiro. Não é perfeito, é apenas o melhor que temos. Abandoná-lo, junto com seus protocolos céticos, é o caminho para a idade das trevas. (Carl Sagan)

RESUMO

Em termos de produção de revestimentos metálicos, o Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó (PTA-P) representa uma das alternativas mais apropriadas dentre os processos de soldagem a arco, além de figurar como importante ferramenta em pesquisas metalúrgicas. Entretanto, suas funções científicas, associadas a prospecções para aplicabilidade em operações de soldagem mais avançadas, como manufatura aditiva e fabricação de estruturas compósitas, acabam impondo sérios desafios tecnológicos. Nesta conjuntura, muitas adversidades estão relacionadas ao dispositivo alimentador de pó (ADP), já que tais aplicações costumam envolver materiais não padronizados, ou exigir alta performance na adição dos consumíveis. Adicionalmente, deve ser considerado que os sistemas de alimentação de pó, para PTA-P, carecem de recursos de medição apropriados. Neste sentido, além de favorecer monitoramento de procedimentos e controle de dispositivos de soldagem, um sensor pode viabilizar comunicação com sistemas ciber-físicos, informando dados de adição de material a redes de gerenciamento na indústria 4.0. Sob outro aspecto, a escassez de atuadores capazes de proporcionar controle dinâmico do fluxo de alimentação, também é notória. Semelhantes recursos, além de possibilitar melhorias na eficiência do consumo de pó por parte do PTA-P, podem propiciar ampliação de estratégias processuais, convenientes à confecção de estruturas compósitas. Em virtude das privações tecnológicas mencionadas e seus respectivos benefícios, a presente tese de doutorado contribuiu com desenvolvimento, análise e caracterização de novos dispositivos. Um deles consiste em um sensor inédito de fluxo de pó, baseado no princípio dos medidores centrífugos de sólidos particulados. Outro novo recurso corresponde a uma válvula de controle dinâmico de alimentação, baseada em mecanismo motorizado para desvio proporcional de fluxo de pó. Complementarmente, o presente trabalho realizou análises comparativas de performance operacional, entre o tradicional ADP de Tambor e o novo ADP de Esteira. No tocante ao Sensor de Fluxo de pó, mostrou compatibilidade com o sistema de soldagem PTA-P, além de capacidade para medir taxa de alimentação online ao processo, exibindo boa repetibilidade ao longo de faixa operacional conveniente. Embora lenta para controle de dispositivos, a dinâmica do sinal ainda favoreceu monitoramento do consumo de pó, exibindo caráter promissor à comunicação com sistemas industriais inteligentes. Ademais, demonstrou níveis desprezíveis de influências referentes a condições de instalação e outros parâmetros de processo. Já no que diz respeito aos ADP's, ambos refletiram dependência de recursos especiais de acionamento, além de apresentarem flutuações na taxa de alimentação, causadas por imperfeições de seus mecanismos. Tais efeitos podem prejudicar o desempenho do PTA-P em operações mais avancadas, como manufatura aditiva. Ainda assim, o ADP de Tambor forneceu alimentação de melhor gualidade operando com pós padrão PTA-P. Por outro lado, o ADP de Esteira pode manipular número mais amplo de consumíveis, tolerando problemas relacionados à forma, tamanho e propriedades magnéticas das partículas. Por fim, no que concerne à Válvula de Controle Dinâmico, forneceu desvio proporcional de fluxo de partículas em caráter não linear, além de se mostrar apta a operar em faixa de freguência adequada ao PTA-P. Embora capaz de colaborar para aumento da eficiência de consumo de pó por parte do processo, suas vias apresentaram vazamentos, inibindo sua aplicabilidade em estratégias processuais favoráveis à fabricação de estruturas e revestimentos compósitos.

Palavras-chave: Alimentador de Pó. Sensor de Fluxo. Válvula de Controle Dinâmico.

ABSTRACT

In terms of metallic coatings production, Plasma Transferred Arc with Powder (PTA-P) is one of most appropriate alternatives among arc welding processes, further on to being an important tool in metallurgical researches. However, its scientific functions, associated with prospecting for applicability in advanced welding operations, such as additive manufacturing and manufacturing of composite structures, end up imposing serious technological challenges. In this context, many adversities are related to the powder feeder device (ADP), since such applications trend to involve non-standard materials, or require high performance in consumables addition. In addition, it must be considered that PTA-P powder feeding systems, needs appropriate measurement resources. In this way, further on promoting procedures monitoring and welding devices control, a sensor can allows communication with cyber-physical systems, informing material addition data to management networks in industry 4.0. In another look, the shortage of actuators capable to provides dynamic control of feeding flow is also notorious. Similar resources, further on to enabling improvements in powder consumption efficiency by PTA-P, can provide expansion of procedural strategies, suitable for composite structures manufacturing. Due to mentioned technological deprivations and their respective benefits, the present doctoral thesis contributed to new devices development, analysis and characterization. One of them consists on an inedited powder flow sensor, based on bulk solids centrifugal meters principle. Another new resource is a dynamic feed control valve, based on a motorized mechanism for powder flow proportional deviation. Complementary, the present work carried out comparative analysis of operational performance, between traditional Tambor ADP and new Belt Conveyor ADP. Regarding the Powder Flow Sensor, it showed compatibility with PTA-P welding system, in addition to capability to measure feed rates online to the process, showing good repeatability over a convenient operational range. Although too slow to devices control, the signal dynamics still befriend powder consumption monitoring, showing promising properties for communication with intelligent industrial systems. Furthermore, it demonstrated negligible levels of influences regarding installation conditions and other process parameters. As for the ADP's, both reflected dependence on special driving resources, further on fluctuations in feed rate, caused by imperfections in their mechanisms. Such effects can impair the PTA-P performance in advanced operations, like additive manufacturing. Even so, the Tambor ADP provided better feed guality operating with standard PTA-P powders. On the other hand, the Belt ADP can handle a larger number of consumables, tolerating problems related to the shape, size and magnetic properties of the particles. Finally, with regard to Dynamic Control Valve, it provided particle flow proportional deviation with non-linear character, in addition to being able to operate in appropriate frequency range to the PTA-P. Although able to collaborate to the increase powder consumption efficiency by the process, its internal ways showed leaks, inhibiting its applicability in process strategies favorable to structures and composite coatings manufacturing.

Keywords: Powder Feeder. Flow Sensor. Dynamic Control Valve.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1- Aspectos gerais de um sistema de soldagem PTA-P
Figura 3.2 - Características da adição de pó no PTA-P: a) Encontro dos jatos de pó
expelidos da tocha; b) precipitação de partículas no momento da adição do material à
poça de fusão
Figura 3.3 - Tocha apta a operação com dois ADP's munida de dois grupos de canais
independentes: a) detalhes internos; b) vista externa
Figura 3.4 – Aplicação industrial do processo PTA-P: a) Depósito de STELLITE6 sobre
crista de rosca: b) Ensaio de Raio X ⁻ c) Revestimento após usinagem 32
Figura 3.5 – Análise macrográfica de corpo de prova com deposição de uma camada
de revestimento de liga experimental
Figura 3.6 – Macrografias de estruturas multicamadas produzidas por processo PTA
a) Inconel 625 em arame: h) Inconel 625 em pó
Figura 3.7 – Micrografias por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) mostrando
a microestrutura de cada camada depositada
Figura 3.8 – Processos de fabricação e morfologia de nós utilizados na indústria
mecânica: a) processo de atomização: b) pó atomizado: c) processo de trituramento:
d) pó triturado
Eigura 3.0 Principais aspectos de distribuição grapulomátrica do pá padrão PTA P
Figura 5.9 – Finicipais aspectos de distribulção granulometrica de po padrao FTA-F
Figure 2.10 – Dresedimente normatizado nore determinação de densidado encrento:
rigura 5.10 – Frocedimento normalizado para determinação de densidade aparente.
a) escoamento no Funil de Hall, b) Deposição no intenor do Copo de Densidade, c).
Figure 2.11. Desires de sessemente e) sessemente en messe h) sessemente en
Figura 3. 11 – Regimes de escoamento: a) escoamento em massa; b) escoamento em
TUNII
Figura 3.12 – Defeitos de escoamento: a) escoamento interrompido por arco; b)
escoamento interrompido por caminno de rato40
Figura 3.13 – Metodos gravitacionais de medição de escoabilidade pelo angulo de
emplihamento: a) método da injeção; b) método da descarga; c) método da inclinação
Figura 3.14 – Medição do ângulo de empilhamento de mistura experimental de pós
Figura 3.15 – Representação esquemática de sistema básico de alimentação de pó
com seus principais componentes44
Figura 3.16 – Reservatórios para escoamento em massa: à esquerda silo com
tremonha cônica; à direita silo com tremonha em forma de cunha
Figura 3.17 – Representação esquemática de compatibilidade geométrica entre
reservatórios e mecanismos manipuladores: a) ADP de Tambor; b) ADP de Esteira
Figura 3.18 – Regimes de fluidização em função do aumento da velocidade do gás
Figura 3.19 – Curva de calibração anômala obtida com ADP de Tambor
Figura 3.20 – Método de preenchimento de bordas chanfradas de peça guadrada: a)
projeto do perfil da borda após usinagem: b) junta formada entre peça e backing de
cobre
Figura 3.21 – Soldagem de bordas chanfradas: a) perspectiva da peca com bordas
preenchidas com Stellite 6 por soldagem PTA-P [•] b) variações na altura do reforço das
soldas

Figura 3.22 – Escoamento interrompido por formação de arco e aderência de Figura 3.23 – Alimentação problemática de pó alternativo com ADP de Tambor: a) escoamento interrompido por caminho de rato; b) escoamento interrompido por arco; Figura 3.25 – Dispositivo Rapid Powder Switch (RPS): a) Perspectiva do modelo em Figura 3.26 – Vantagens do Rapid Powder Switch (RPS): a) Revestimento composto Figura 3.27 – Protótipo para medição de fluxo mássico de pó por eletrificação de partículas em tubos impregnados60 Figura 3.28 – Aparato de medição de fluxo de consumíveis em pó por método LASER para soldagem LASER......61 Figura 3.31 – Métodos para acionamento de motores de passo: a) passo completo; b) meio-passo; c) micro-passo; d) efeito do recurso Smooth sobre energização das Figura 4.1 – Vista em corte do Sensor de Fluxo de Pó69 Figura 4.2 – Centrifugador: a) Vista em perspectiva isométrica; b) Vista superior em Figura 4.3 – Motor RF-300CA-11400: a) Aspecto físico do motor; b) Motor acoplado Figura 4.4 – ADP de Tambor Dosador: a) Aspecto físico do equipamento; b) Vista em corte da estrutura mecânica com principais componentes: 1 – Tambor, 2 – Canal de Descarga, 3 – Funil do Reservatório, 4 – Regulador Manual de Dosagem, 11 – Figura 4.5 – Regulagem do Gap (δ) no ADP de Tambor Dosador: a) Regulador do Gap baseado em mecanismo de escala e nônio; b) Gap de 1,5 mm; c) Gap de 3,0 mm e principais elementos envolvidos......73 Figura 4.6 – ADP de Esteira: a) Aspecto físico do dispositivo; b) Vista em perspectiva do projeto em Ambiente CAD......74 Figura 4.7 – Alterações no mecanismo do ADP de Esteira: a) Configuração original com Polias de Apoio e Esteira Artesanal; b) Configuração atual com Suporte e Esteira Figura 4.8 – Componentes de Apoio da Esteira a) Polia de Apoio; b) Suporte76 Figura 4.9 – Comparação de detalhes entre esteiras: a) Esteira Artesanal; b) Esteira Impressa......77 Figura 4.10 – Motor de Passo NEMA 23 KTC-HT23-397: a) Imagem do motor; c) Curva Figura 4.11 – Válvula de Controle Dinâmico de Fluxo de Pó: a) configuração para uso Figura 4.12 – Aspectos Gerais do Motor da Válvula de Controle Dinâmico de Fluxo de Pó: a) motor de passo modelo M42SP-13NK; c) curva de relação torque x velocidade do motor......80 Figura 4.13 – Diagrama de potência do sistema de controle dos protótipos estudados

Figura 4.14 – Aspectos Gerais do Motor da Válvula de Controle Dinâmico de Fluxo de
Pó: a) motor de passo modelo M42SP-13NK; c) curva de relação torque x velocidade
do motor
Figura 4.15 – Tela da IDE do Arduino com recurso Monitor Serial
Figura 4.16 – Fonte de alimentação do Sensor de Fluxo de Pó
Figura 4.17 – Central de Controle e Acionamento e principais componentes
Figura 4.18 – Driver STR8 da Applied Motion Products
Figura 4 19 – Placa Arduino Uno 88
Figura 5.1 – Bancada de soldagem PTA-P disponível no LABSOLDA - UESC 91
Figura 5.2 – Bancada de avaliação do Sensor de Fluxo de Pó
Figura 5.3 – Aspectos geométricos dos centrifugadores testados 95
Figura 5.4 – Aspectos geométricos da Cápsula: a) Sensor de Tampa Inclinada: b)
Sensor de Tampa Perpendicular 97
Figura 5.5 – Perfil de acionamento do ADP de Tambor durante análises do
comportamento dinâmico do sinal do sensor perante alimentação intermitente 99
Figura 5.6 – Influência da inclinação do sensor de fluxo de pó: a) Posição normalmente
vertical: h) Posição inclinada
Figura 5.7 – Influência da aceleração da gravidade: a) mangueira de 20 mm; b)
manqueira de 200 mm ⁻ c) manqueira de 400 mm
Figura 5.8 – Influência de movimento oscilatório sobre o Sensor de Fluxo de Pó 108
Figura 5.9 – Análises de Influência do Sensor de Fluxo de Pó sobre transporte
pneumático: a) configuração de bancada para análise videográfica: b) linha
preumática com apenas o sensor de medição: c) linha preumática com sensores de
agitação e medição em série
Figura 5 10 – Aspectos morfológicos e noções granulométricas dos pós selecionados:
a) Inconel 625 b) Stellite 6 c) Inox 430 d) Inox 316L e) Inox 316L Eino f) Base Ee-
Ni 114
Figura 5 11 – Bancada de soldagem PTA-P configurada para levantamento da taxa
mássica em função da rotação
Figura 5 12 – Bancada de soldagem PTA-P configurada para monitoramento de ciclo
completo de operação
Figura 5.13 – Bancada de soldagem PTA-P configurada para investigação de
influência de vibração do motor de passo
Figura 5.14 – Bancada configurada para análise da Válvula de Controle Dinâmico de
Pó
Figura 6 1– Influência do comprimento das pás do Centrifugador sobre o sinal de
tensão do sensor
Figura 6.2 – Redução da sensibilidade em função do aumento do raio de curvatura
das pás: a) forca de impacto total: b) decomposição da forca de impacto: c) rolamentos
de partículas
Figura 6.3 – Influência de parâmetros geométricos da Cápsula sobre o sinal de tensão
do sensor
Figura 6.4 – Ciclo completo de medição de fluxo de pó
Figura 6.5 – Ciclo completo de medição de fluxo de pó
Figura 6.6 – Gráfico de relação entre taxa de alimentação e rotação do Tambor do
ADP
Figura 6 7 – Curva característica da tensão do sensor em função da rotação do tambor
do ADP
Figura 6.8 – Curva característica da taxa mássica de alimentação de pó em função da
tensão do sensor

Figura 6.9 – Comportamento da tensão do sensor em função da vazão do gás de Figura 6.10 – Comportamento da tensão do sensor em função do ângulo de instalação Figura 6.11 - Comportamento da tensão do sensor em função da aceleração da gravidade......143 Figura 6.12 - Comportamento do sinal do sensor em função da frequência de oscilação145 Figura 6.13 – Influência do sensor sobre flutuações instantâneas no transporte pneumático......146 . Figura 6.14 – Influência do sensor sobre flutuações de longo período no transporte pneumático......147 Figura 6.15 – Emprego do Sensor de Fluxo de Pó no monitoramento da taxa de alimentação durante soldagem PTA-P.....148 Figura 6.16 – Sinal de medição do Sensor de Fluxo de Pó durante procedimento de soldagem com alimentação intermitente149 Figura 6.17 – Taxa mássica em função da rotação do Tambor do ADP151 Figura 6.18 – Magnetização de partículas de pó Inox 430 (ferromagnético) no Canal de Descarga do ADP de Tambor: a) magnetização por presença do motor; b) Sem aderência de partículas devido à ausência do motor152 Figura 6.19 – Taxa volumétrica em função da rotação do Tambor do ADP......153 Figura 6.20 – Taxa mássica em função da rotação da Esteira do ADP155 Figura 6.21 – Taxa volumétrica em função da rotação da Esteira do ADP157 Figura 6.22 – Influências da presença de vibração do motor de passo no ADP de Figura 6.23 – Visão da pilha de pó formada no gap do ADP entre o canal de descarga do reservatório e a superfície curva do tambor160 Figura 6.24 – Influências da presença de vibração do motor de passo no ADP de Figura 6.25 – Partículas caídas sobre a rampa do ADP de Esteira durante ensaio sem vibração......163 Figura 6.26 – Inundação da rampa do ADP de Esteira com pó durante ensaio com vibração......164 Figura 6.27 – Monitoramento da taxa mássica de alimentação de pó em função do esvaziamento do reservatório do ADP de Tambor.....165 Figura 6.28 – Monitoramento da taxa mássica de alimentação de pó em função do esvaziamento do reservatório do ADP de Esteira167 Figura 6.29 – Trecho inicial do monitoramento da taxa mássica de alimentação de pó Figura 6.30 – Trecho central do monitoramento da taxa mássica de alimentação de pó Figura 6.31 – Imperfeições do mecanismo de dosagem do ADP de Tambor: a) Excentricidade do Tambor; b) Cambagem do Tambor......170 Figura 6.32 – Efeito das imperfeições do mecanismo de dosagem do ADP de Esteira sobre a altura da dose de pó.....171 Figura 6.33 – Trecho final do monitoramento da taxa mássica de alimentação de pó Figura 6.34 – Condições finais de escoamento de pó na tremonha do ADP de Tambor: a) excentricidade de escoamento por presença de tubo de pressurização; b) partículas

Figura 6.35 – Taxa mássica do ADP de Tambor em função da vazão de gás de arraste Figura 6.36 – Taxa mássica do ADP de Esteira em função da vazão de gás de arraste Figura 6.37 – Saída da Linha de Transporte Pneumático do ADP de Tambor operando com Inox 316L Padrão: a) oscilação de fluxo em fase esparsa; b) oscilação de fluxo em fase densa......176 Figura 6.38 – Saída da Linha de Transporte Pneumático do ADP de Esteira operando com Inox 316L Padrão: a) oscilação de fluxo em fase esparsa; b) oscilação de fluxo Figura 6.39 – Saída da Linha de Transporte Pneumático do ADP de Esteira operando com Inox 316L Fino: a) oscilação de fluxo em fase esparsa; b) oscilação de fluxo em fase densa......178 Figura 6.40 – Revestimento de Inox 316L Padrão composto por cordões filetados sobrepostos produzidos via processo PTA-P com ADP de Tambor179 Figura 6.41 – Revestimento de Inox 316L Padrão composto por cordões filetados Figura 6.42 - Revestimento de Inox 316L Fino composto por cordões filetados Figura 6.43 – Desempenho proporcional da Válvula de Controle Dinâmico de Fluxo de Figura 6.44 – Desempenho proporcional da Válvula de Controle Dinâmico de Fluxo de Pó em posição Horizontal......185 Figura 6.45 – Análise visual do comportamento do fluxo de partículas em função da

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Principais características do Motor RF-300CA-11400	.71
Tabela 4.2 – Principais características do Motor NEMA 23 KTC-HT23-397	.78
Tabela 4.3 – Principais características do Motor M42SP-13NK	.81
Tabela 5.1 – Valores de características inalteradas em uma mesma série na avaliad	ção
da geometria do Centrifugador	.96
Tabela 5.2 – Parâmetros mantidos constantes na avaliação da geometria	do
Centrifugador	.96
Tabela 5.3 – Parâmetros empregados em avaliações da geometria da Cápsula	.98
Tabela 5.4 – Parâmetros empregados em análises do desempenho dinâmico do si	inal
do sensor perante alimentação intermitente1	100
Tabela 5.5 – Parâmetros usados durante calibração do ADP de Tambor1	101
Tabela 5.6 - Parâmetros empregados durante levantamento da curva de tensão	do
sensor em função da rotação do ADP de Tambor1	102
Tabela 5.7 – Parâmetros de avaliação da influência da vazão de gás de arraste1	103
Tabela 5.8 – Parâmetros empregados em investigações sobre influências	da
inclinação do Sensor de Fluxo de Pó1	105
Tabela 5.9 – Parâmetros empregados em investigações a respeito de influências	da
aceleração da gravidade1	107
Tabela 5.10 – Parâmetros de avaliação sobre influências de movimentos oscilatór	rios
sobre o sinal de medição do Sensor de Fluxo de Pó1	109
Tabela 5.11 – Principais parâmetros empregados nas análises de influências	do
Sensor de fluxo de Pó sobre transporte pneumático1	111
Tabela 5.12 – Parâmetros de ensaio de soldagem PTA-P empregando o Sensor	de
Fluxo de Pó durante alimentação contínua1	112
Tabela 5.13 – Parametros de ensaio de soldagem PTA-P empregando o Sensor	de
Fluxo de Po durante alimentação intermitente1	113
Tabela 5.14 – Principais características dos pos usados nas análises dos ADP's. 1	115
Tabela 5.15 – Parametros empregados durante levantamento de curvas de taxa	de
alimentação em função da rotação dos ADP's	117
Tabela 5.16 – Parametros empregados em monitoramento da taxa de alimenta	çao
durante descarga completa dos materiais contidos nos reservatorios	119
Tapela 5.17 – Parametros usados durante investigação sobre iniluencias de vibraç	
do motor de passo	121
Tabela 5.18 – Parametros empregados em investigações sobre inituencias da vaz	
de Gas de Arraste sobre taxa de alimentação fornecida pelos ADP's	
trapenarte proumétice	102
Tabala 5.20 Drinainaia parâmetros de soldagem empregados em etividados prétiv	123
anvolvendo en ADD's de Tember e Esteire	104
Tabola 5.21 Parâmetros empregados em análisos de proparsionalidade entre fl	124
de pó e acionamento da válvula	126
Tabela 5.22 – Parâmetros empregados em análises de freguência de operação	021 da
Válvula de Controle Dinâmico de Fluvo de Pó	ua 127
Tabela 6 1 – Análise do volume dosado por 1 rotação do Tambor	15/
Tabela 6.2 – Análise do volume dosado por 1 rotação do Fatilion	157
	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOGIAS

- ADP Alimentador de Pó
- B Diâmetro do canal de descarga de tremonha cônica
- B_p Largura do canal de descarga de tremonha em forma de cunha
- C Posicionamento alinhado do Tambor com o Canal de Descarga
- CAD Computer Aided Design
- CC Corrente Contínua
- CPU Central Processing Unit
- D Diâmetro ou largura de cilindros de tremonhas em geral
- dc Excentricidade do Tambor do ADP
- Dir Sinal elétrico para determinação de sentido de giro de motor de passo
- DI Deslocamento lateral do Tambor do ADP para direita
- Dp Distância máxima entre polias e o Canal de Descarga do ADP de Esteira
- dp Distância mínima entre polias e o Canal de Descarga do ADP de Esteira
- Dt Distância máxima entre o Tambor e o Canal de Descarga
- dt Distância mínima entre o Tambor e o Canal de Descarga
- E Deslocamento lateral do Tambor do ADP para esquerda
- Ecc Tensão induzida em motor CC
- Fip Força de impacto de uma partícula sobre uma pá do Centrifugador
- Fx Componente X da força de impacto de uma partícula
- Fy Componente Y da força de impacto de uma partícula
- H Altura de cilindros de tremonhas em geral
- HPTA High Power Plasma Transferred Arc
- Icc Corrente elétrica circulante em motor CC
- IDE Integrated Development Environment
- IHM Interface Homem-Máquina
- k Constante correspondente a aspectos construtivos de motor CC
- L Comprimento do canal de descarga de tremonha em forma de cunha
- LASER Light Amplification by Simulated Emission of Radiation
- LCD Liquid Crystal Display
- MPTA Micro Plasma Transferred Arc
- m_f Valor final de massa de um intervalo de alimentação de pó
- mi Valor inicial de massa de um intervalo de alimentação de pó

- N Rotação de motor CC
- n Rotação do Tambor
- PAW Plasma Arc Welding
- PTA Plasma Transferred Arc
- PTA-A Plasma Transferred Arc alimentado com Arame
- PTA-P Plasma Transferred Arc alimentado com Pó
- R² Coeficiente de comparação entre modelo matemático e fenômeno real
- RPS Rapid Powder Switch
- Res Repetibilidade do Sensor de Fluxo de Pó
- S Tensão do Sensor de Fluxo de Pó
- Step Sinal elétrico para movimentação de motor de passo
- TIG Tungsten Inert Gas
- t_f Valor final de tempo de um intervalo de alimentação de pó
- t_i Valor inicial de tempo de um intervalo de alimentação de pó
- Txm Taxa mássica de alimentação de pó
- TxV Taxa volumétrica de alimentação de pó
- USB Universal Serial Bus
- u Símbolo genérico de desvio-padrão
- Vcc Tensão elétrica sobre motor CC
- Zcc Impedância do motor CC
- αc Ângulo de afunilamento de tremonha cônica
- α_p Ângulo de inclinação de paredes de tremonha em forma de cunha
- α Diâmetro das pás do centrifugador
- β Número de pás do centrifugador
- γ Inclinação do teto do centrifugador
- δ Gap do ADP de Tambor
- δ_c Comprimento das pás do centrifugador
- ϵ Raio de curvatura das pás do centrifugador
- ζ Altura do centrifugador
- ρ_{po} Densidade aparente dos pós

- φT Ângulo de cambagem do Tambor do ADP

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	CONSIDERAÇÕES SOBRE ALIMENTADORES DE PÓ	16
1.2	CONSIDERAÇÕES SOBRE MEDIÇÃO DE FLUXO DE PÓ	17
1.3	CONSIDERAÇÕES SOBRE ALIMENTAÇÃO DINÂMICA DE PÓ	18
1.4	ESTRUTURA DO TEXTO	19
2 2.1	OBJETIVOS, JUSTIFICATIVAS E ESTRUTURA DO TEXTO OBJETIVOS	21 21
2.1.1	Objetivo Geral	21
2.1.2	Objetivos Específicos	22
2.2	JUSTIFICATIVAS	23
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E TECNOLÓGICA	25
3.1	TÓPICOS PRIMORDIAIS DO PROCESSO PTA-P	25
3.1.1	Aspectos Gerais de um Sistema de Soldagem PTA-P	25
3.1.2	Adição de Consumíveis no Processo PTA-P	28
3.1.3	Aplicações do Processo PTA-P	30
3.1.3.1	Exemplo de Aplicação Industrial	31
3.1.3.2	Exemplos de Aplicações em Pesquisas Científicas	32
3.2	PROPRIEDADES FUNDAMENTAIS DE MATERIAIS EM PÓ	35
3.2.1	Aspectos Morfológicos	35
3.2.2	Aspectos Granulométricos	36
3.2.3	Considerações Sobre Densidade Aparente	38
3.2.4	Considerações Sobre Escoabilidade	39
3.2.4.1	Regimes de Escoamento	39
3.2.4.2	Defeitos de Escoamento	40
3213		
0.2.4.0	Métodos de Medição de Escoabilidade	41

3.3.1	Sistema de Alimentação e Alimentador de Pó	.43
3.3.2	Aspectos Mecânicos dos Principais Elementos dos ADP's	.44
3.3.2.1	Aspectos Sobre Reservatórios	.44
3.3.2.2	Aspectos Sobre Mecanismos Manipuladores	.46
3.3.2.3	Aspectos Sobre Transporte Pneumático	.48
3.4	LIMITAÇÕES DO PROCESSO DE SOLDAGEM PTA-P	.49
3.4.1	Sensibilidade à Vibração do Motor de Passo	. 50
3.4.2	Variações na Altura de Cordões de Solda	.51
3.4.3	Magnetização de Partículas no Interior do ADP de Tambor	. 53
3.4.4	Dificuldades em Alimentação de Pós Alternativos	. 54
3.5	ALIMENTAÇÃO DINÂMICA DE PÓ	.56
3.5.1	Válvula Direcionadora de Pó	. 56
3.5.2	Rapid Powder Switch	. 57
3.6	MEDIÇÃO DE FLUXO DE PÓ	.59
3.6.1	Medição de Fluxo de Pó por Método Eletrostático	. 59
3.6.2	Medição de Fluxo de Pó por Método LASER	.61
3.6.3	Medição de Fluxo de Pó por Método Centrífugo	.62
3.7	TECNOLOGICAS DE ACIONAMENTOS ELETROELETRÔNICOS	.64
3.7.1	Motor CC com Escovas	.64
3.7.2	Motor de Passo	.66
4	DISPOSITIVOS E RECURSOS DE ACIONAMENTO E CONTROLE	.68
4.1	SENSOR DE FLUXO DE PÓ	.68
4.2	ALIMENTADORES DE PÓ	.72
4.2.1	ADP de Tambor	.72
4.2.2	ADP de Esteira	.74
4.3	VÁLVULA DE CONTROLE DINÂMICO DE FLUXO DE PÓ	.79
4.4	RECURSOS DE ACIONAMENTO E CONTROLE	.81

4.4.1	Computador84	1
4.4.2	Fonte de Corrente	5
4.4.3	Central de Controle e Acionamento86	3
5	MATERIAIS E MÉTODOS89)
5.1	ANÁLISE DO SENSOR DE FLUXO DE PÓ92	2
5.1.1	Influência de Parâmetros Geométricos do Centrifugador94	1
5.1.2	Influência da Geometria da Cápsula96	3
5.1.3	Análises Metrológicas98	3
5.1.3.1	Análise de Desempenho Dinâmico do Sensor de Fluxo de Pó99	9
5.1.3.2	Análise de Desempenho Estático do Sensor de Fluxo de Pó100)
5.1.4	Influência da Vazão de Gás de Arraste102	2
5.1.5	Influência da Inclinação do Sensor104	1
5.1.6	Influência da Aceleração da Gravidade106	3
5.1.7	Influência de Movimento Oscilatório107	7
5.1.8	Análise de Influência sobre Transporte Pneumático109	9
5.1.9	Ensaios de Soldagem com o Sensor de Fluxo de Pó112	2
5.2	ANÁLISE SOBRE OS ALIMENTADORES DE PÓ 113	3
5.2.1	Taxa de Alimentação de Pó em Função da Rotação115	5
5.2.2	Monitoramento de Ciclo Completo de Operação118	3
5.2.3	Influência da Vibração do Motor de Passo119	3
5.2.4	Influência da Vazão de Gás de Arraste121	1
5.2.5	Análise Visual de Fluxo de Pó em Transporte Pneumático	3
5.2.6	Atividades Práticas de Soldagem com os ADP's124	1
5.3	ANÁLISE DA VÁLVULA DE CONTROLE DINÂMICO DE PÓ125	5
5.3.1	Análise de Proporcionalidade entre Fluxo de Pó e Acionamento 128	5
5.3.2	Análise de Frequência de Operação127	7
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES128	3
6.1	CARACTERIZAÇÃO DO SENSOR DE FLUXO DE PÓ 128	3

6.1.1	Influência de Parâmetros Geométricos do Centrifugador	.128
6.1.2	Influência de Parâmetros Geométricos da Cápsula	.132
6.1.3	Caracterizações Metrológicas	.134
6.1.3.1	Caracterização do Comportamento Dinâmico	. 134
6.1.3.2	Caracterização do Comportamento Estático	. 137
6.1.4	Influência da Vazão de Gás de Arraste	. 140
6.1.5	Influência do Ângulo de Instalação	. 142
6.1.6	Influência da Aceleração da Gravidade	. 143
6.1.7	Influência de Movimento Oscilatório	. 144
6.1.8	Influência Sobre Transporte Pneumático	. 145
6.1.9	Soldagem com o Sensor de Fluxo de Pó	. 147
6.2	CARACTERIZAÇÃO DOS ALIMENTADORES DE PÓ	. 149
6.2.1	Taxa de Alimentação de Pó em Função da Rotação	. 150
6.2.1.1	Taxa de Alimentação de Pó em Função da Rotação do Tambor	. 150
6.2.1.2	Taxa de Alimentação de Pó em Função da Rotação da Esteira	. 154
6.2.2	Influência da Vibração do Motor de Passo	. 158
6.2.2.1	Influência da Vibração do Motor de Passo no ADP de Tambor	. 158
6.2.2.2	Influência da Vibração do Motor de Passo no ADP de Esteira	. 161
6.2.3	Monitoramento Contínuo de Operação	. 164
6.2.3.1	Trecho Inicial do Monitoramento do Ciclo de Operação	. 168
6.2.3.2	Trecho Central do Monitoramento do Ciclo de Operação	. 169
6.2.3.3	Trecho Final do Monitoramento do Ciclo de Operação	. 171
6.2.4	Influência de Vazão de Gás de Arraste na Dosagem dos ADP's	.173
6.2.5	Qualidade do Fluxo de Pó em Transporte Pneumático	.175
6.2.6	Desempenho dos ADP's em Soldagem PTA-P	. 179
6.3	CARACTERIZAÇÃO DA VÁLVULA DE CONTROLE DINÂMICO	. 182
6.3.1	Desempenho Proporcional de Desvio de Fluxo de Pó	.182

6.3.1.1	Desempenho Proporcional de Desvio de Fluxo em Posição Vertical	183
6.3.1.2	Desempenho Proporcional de Desvio de Fluxo em Posição Horizontal	184
6.3.2	Fluxo de Pó em Função da Frequência de Operação	185
7	CONCLUSÕES	187
7.1	CONCLUSÕES SOBRE O SENSOR DE FLUXO DE PÓ	187
7.2	CONCLUSÕES SOBRE OS ADP'S	189
7.3	CONCLUSÕES SOBRE A VÁLVULA DE CONTROLE DINÂMICO	191
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	193
8.1	PROPOSTAS RELATIVAS AO SENSOR DE FLUXO DE PÓ	193
8.2	PROPOSTAS RELATIVAS AOS ALIMENTADORES DE PÓ	193
8.3	PROPOSTAS RELATIVAS A VÁLVULA DE CONTROLE DINÂMICO	194
	REFERÊNCIAS	195

1 INTRODUÇÃO

Seja no âmbito da fabricação de peças ou no cenário da manutenção mecânica, processos de soldagem a arco são amplamente empregados para execução de revestimentos metálicos. Contudo, um processo que vem sendo aplicado de forma crescente na indústria mundial e, ultimamente, chamando a atenção de empresas brasileiras, consiste no processo chamado PTA-P (Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó). Este corresponde a uma variante do processo de soldagem Plasma, a qual utiliza material de adição em forma de pó. Características favoráveis a uma distinta estabilidade da poça de fusão, como alta rigidez do arco e baixa influência mecânica do pó, possibilitam maior controlabilidade de aspectos metalúrgicos e geométricos das soldas [1]. Dentre as aplicações mais correntes da soldagem PTA-P no setor industrial destacam-se deposição de materiais à base de ferro, cobalto ou níquel em forma de pó [2], por sua vez, compostos por partículas de formato e tamanho adequados ao processo [1,3,4].

A tendência crescente na adoção do PTA-P em linhas de produção fabris, associada a resultados divulgados, vêm evidenciando suas peculiaridades processuais. Estas acabam por influenciar pesquisadores, induzindo vislumbres sobre potencialidades para novas aplicações. Neste contexto, as atividades científicas vêm explorando o PTA-P como ferramenta científica, ou, como alternativa para aplicações já existentes. Dentro de ambas perspectivas, o referido processo vem sendo envolvido em operações de soldagem mais avançadas, como manufatura aditiva [5] e fabricação de estruturas compósitas [6], proporcionando, essencialmente, estudos metalúrgicos sobre resultados de soldagem. Por outro ângulo, a utilização do consumível em forma de pó propicia fusão de misturas experimentais retornando, como metal de solda, liga derivada de fórmulas teóricas [3,7,8].

Em contrapartida, atividades científicas e operações mais ousadas costumam revelar limitações operacionais, principalmente, no que tange ao aporte de consumível [3,4]. Para esta função, o sistema de soldagem PTA-P conta com um subsistema dedicado à adição de material, cujo principal componente é o alimentador de pó, ou ADP. Sob outros aspectos é sabido, também que, mesmo sistemas mais modernos

de alimentação de pó para o processo PTA-P, ainda carecem de recursos customizados em termos de medição e controle dinâmico de alimentação. Em relação a isto, além de favorecer monitoramento de procedimentos e controle de dispositivos de soldagem, um sinal de medição pode viabilizar comunicação com sistemas ciber-físicos, informando dados de adição de material a redes de gerenciamento na indústria 4.0. Já no que concerne a controle dinâmico de alimentação, um atuador adequado pode possibilitar melhorias na eficiência do consumo de pó por parte do PTA-P. Além disto, pode, também, propiciar ampliação de estratégias processuais, convenientes à fabricação de estruturas compósitas por manufatura aditiva, ou revestimentos multimateriais. Dentro do contexto estabelecido, estão imersos três principais tópicos, sobre os quais as próximas sessões discorrem considerações pertinentes.

1.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE ALIMENTADORES DE PÓ

Os ADP's disponíveis no mercado são projetados para operar com materiais em pó padronizados, compostos por partículas de formatos e faixa dimensional adequados ao processo PTA-P. Dentre os alimentadores conhecidos atualmente, um dos tipos mais difundidos consiste no ADP de Tambor. Por conta disto, o LABSOLDA adota, como componente padrão de sua bancada PTA-P, o referido modelo.

Entretanto, em atividades científicas, o ADP de Tambor, por vezes, também manifesta comportamentos indesejados. Em aplicações de cordões filetados, foram observadas ondulações no topo das soldas, as quais podem estar relacionadas a irregularidades de alimentação ainda desconhecidas. Já durante calibração, foi percebida forte influência de vibrações sobre a taxa de alimentação. Provocadas por acionamento atípico do ADP, estas levantaram questionamentos sobre o grau de dependência entre a performance do dispositivo e seu modo de acionamento. Outra adversidade corresponde à imantação de pó ferromagnético no interior do ADP de Tambor [1]. Semelhante manifestação tende a provocar interrupção da alimentação por entupimento, durante operação com esta classe de materiais. Entretanto, as causas mais frequentes de interrupção de alimentação ocorrem durante operação com consumíveis alternativos, frequentemente presentes em misturas experimentais [9]. Normalmente, manifestam defeitos de escoamento, como entupimento ou estagnação do consumível, no interior do ADP de Tambor.

Perante tais adversidades, o LABSOLDA vem empreendendo esforços no sentido de desenvolver modelos de ADP's mais aptos às pesquisas científicas [1,9,10]. Sob esta temática, um trabalho recente adotou o princípio mecânico das Esteiras Transportadoras [11]. Tal fundamento, por sua vez, corresponde a um conceito primitivo do já conhecido mecanismo de Tambor. Embora o referido trabalho tenha gerado um protótipo e caracterizado seu desempenho em operações básicas, ainda se mostram necessárias adequações mecânicas e estudos em diversos aspectos de funcionamento, no intuito de revelar suas qualidade e limitações em comparação ao mecanismo derivado.

1.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE MEDIÇÃO DE FLUXO DE PÓ

É notório que a quantidade de material de adição é um parâmetro crucial para obtenção de soldas satisfatórias e que, sua quantificação, é fundamental para repetibilidade de processos de soldagem. Adicionalmente, além da quantificação de um parâmetro de suma importância, devem ser consideradas vantagens em relação ao monitoramento da taxa de alimentação online ao processo. Estas podem proporcionar, desde supervisão de qualidade do processo, até controle de dispositivos de alimentação.

Por conta das restrições impostas pela carência de recursos metrológicos, atualmente é empregado um método eficaz, porém primitivo, para determinação da taxa de alimentação, baseado em pré-calibração dos ADP's. A técnica mencionada sacia necessidade de quantificação do parâmetro de alimentação. Contudo, não é apropriada para monitoramento ou controle de fluxo de pó e, tampouco, favorece investigações científicas, como desempenho operacional de ADP's e de procedimentos de soldagem. As referidas limitações derivam, primordialmente, da impossibilidade de aplicação deste método no decorrer do processo. Evidentemente, também neste quesito, o LABSOLDA vem contribuindo cientificamente. Nos trabalhos realizados, protótipos para sensoriamento de fluxo, baseados em fenômenos elétricos gerados no transporte de pó, foram desenvolvidos e avaliados. Entretanto, seus sinais de medição mostraram consideráveis interferências, provenientes de uma série de outros fenômenos [1,12].

É fato que existem equipamentos baseados em tecnologia LASER capazes de medir fluxo de pó. Entretanto, aspectos como alta complexidade, incompatibilidades conceituais e vulnerabilidade a condições hostis de soldagem, desfavorecem implementação imediata no sistema PTA-P, além de não serem capazes de medir taxa de alimentação online ao processo [13]. Adicionalmente, o alto custo tende a restringir sua aquisição a situações de extrema necessidade. Inconvenientes semelhantes impedem aplicação de diversas outras tecnologias de medição de fluxo de sólidos particulados. Em contrapartida, um princípio de medição baseado na centrifugação de fluxo de partículas exibe características favoráveis. Embora sejam constituídos geralmente de maquinário pesado e dimensionados para operar com fluxo em escalas de até toneladas por hora, segundo um dos fabricantes [14], o método centrífugo fornece medição contínua de fluxo mássico. Também afirma baixa influência de propriedades dos particulados no sinal de medição, além de baixa sensibilidade a agentes externos.

1.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE ALIMENTAÇÃO DINÂMICA DE PÓ

Atualmente, variantes de alta performance derivadas dos mais expressivos processos de soldagem a arco vêm surgindo, com base nos princípios da alimentação dinâmica. Obrigatoriamente contam com sistemas de alimentação de consumíveis capazes, por sua vez, de permitir variações controladas na quantidade de material de adição, seja em sincronia com a intensidade da fonte calorífica ou não. Dentro deste contexto a literatura especializada reporta sobre desenvolvimentos de dispositivos de alimentação dinâmica, dedicados à operação com consumíveis em pó.

Um destes dispositivos consiste no RPS (*Rapid Powder Switch*). Destinado à aplicação em processo de soldagem LASER alimentado com pó, este equipamento consiste em uma válvula que permite controle *on-off* do consumível [15]. De acordo com esta característica, o RPS possibilita que o processo seja alimentado de maneira intermitente, com intervalos controlados. O fabricante ainda chama atenção para novas possibilidades, em termos de ampliação de estratégias processuais, convenientes à confecção de revestimentos multi-material. Neste sentido, destaca

praticidade na troca do material de adição, por meio de comutação das linhas de alimentação de dois ADP's, o que permite adição sequencial de dois materiais diferentes. Apesar das vantagens mencionadas, tal dispositivo não propicia controle proporcional entre as duas vias. Por conta disto, não é capaz de promover controle de fluxos simultâneos, interessante para misturas de consumíveis *in process*. Pelos mesmos motivos, não é adequado à regulagem de material de adição em função do nível de energia da fonte calorífica.

Por outro lado, o controle proporcional foi observado em outro dispositivo, desenvolvido, por sua vez, em um trabalho realizado no LABSOLDA [12]. Chamado de Válvula Direcionadora de Pó, consiste, basicamente, em uma válvula de desvio de fluxo de pó, acionada por um motor. Concebido para compor o subsistema de alimentação do sistema de soldagem PTA-P, o protótipo viabilizou soldagem sincronizando pulsos de alimentação de pó com pulsos de intensidade da fonte calorífica. Tais estudos apontaram, como principal vantagem, melhorias em eficiência de deposição (menor perda de material), em relação às condições típicas de alimentação de pó [1]. Entretanto, vazamentos externos, travamento do motor e desgaste acentuado acabaram por inutilizar precocemente o dispositivo, impedindo a continuidade dos estudos.

1.4 ESTRUTURA DO TEXTO

A presente tese de doutorado foi estruturada em um total de oito capítulos, além da sessão de referências bibliográficas.

Este capítulo comporta a introdução do trabalho. Contextualiza a soldagem PTA-P dentre os processos de soldagem a arco, além de enfatizar sua relevância na produção de revestimentos metálicos. De forma mais pontual, acaba por declarar considerações sobre limitações e carências, a respeito de componentes e recursos de sistemas de alimentação de consumíveis em pó. Por fim, nesta exata seção, expõe a estrutura textual que compõe a literatura produzida.

Já o capítulo 2 elenca, de forma organizada, os objetivos da presente tese de doutorado. Ademais, versa sobre as justificativas que impulsionaram a realização do referido trabalho.

O capítulo 3, por seu turno, disserta sobre a fundamentação teórica e tecnológica envolvida neste trabalho. Aborda de forma global o sistema de soldagem PTA-P, dando ênfase aos tipos de ADP's estudados e culminando na abordagem de algumas aplicações, industriais e científicas. Nos entremeios, discorre sobre os pós já empregados no PTA-P, além de descrever tecnologias de acionamentos eletroeletrônicos e, ainda, recursos de medição e controle dinâmico de fluxo de pó.

No que concerne ao capítulo 4, este explana os protótipos desenvolvidos e os principais recursos tecnológicos adotados na realização do presente trabalho. Essencialmente detalha, em nível de projeto mecânico, os ADP's de Tambor e de Esteira. De maneira similar aborda o sensor de fluxo de pó e, também, o dispositivo de controle dinâmico de alimentação desenvolvidos.

Por sua vez, o capítulo 5 apresenta os materiais e explica os métodos, empregados, nas análises empreendidas sobre os dispositivos estudados nesta tese. Para cada ensaio, o texto informa o que foi feito, o porquê do teste e como ele foi executado. Diferentes arranjos da bancada PTA-P, assim como recursos de instrumentação, filmagem e fotografia, são relatados nesta parte do trabalho.

O capítulo 6, no que lhe diz respeito, discorre sobre resultados e levanta as respectivas discussões, após o tratamento dos dados produzidos nas experiências. Nesta parte do trabalho, o comportamento de cada dispositivo, perante os ensaios descritos no capítulo anterior, é caracterizado. Gráficos, figuras e tabelas ilustram o desempenho dos ADP's de Tambor e de Esteira, do sensor de fluxo de pó e do dispositivo de controle dinâmico de alimentação.

Com relação ao capítulo 7, este revela as conclusões desta tese de doutorado. Fundamentadas nos resultados obtidos e nas discussões debatidas sobre cada ensaio realizado, esta parte do trabalho ressalta o status dos desenvolvimentos científicos, além de enfatizar sua relevância no contexto que os incentivaram.

Finalmente, o capítulo 8 relaciona sugestões para trabalhos futuros. Neste capítulo são elencados temas advindos dos resultados deste trabalho, os quais justificam empreendimento de novas teses de doutorado e dissertações de mestrado.

2 OBJETIVOS, JUSTIFICATIVAS E ESTRUTURA DO TEXTO

À luz da abordagem exposta na introdução, este capítulo organiza e descreve, em primeiro lugar, os objetivos da presente tese de doutorado. Posteriormente, esta parte do texto discorre sobre tópicos que, em conjunto, pronunciam as justificativas do trabalho.

2.1 OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho se encontram, relatados e respectivamente ordenados, nas seções a seguir.

2.1.1 Objetivo Geral

O objetivo desta tese de doutorado consiste, em termos gerais, em promover a ampliação dos conhecimentos tecnológico-científicos acerca dos ADP's de Tambor e de Esteira, por meio de análises comparativas sobre potencialidades e limitações operacionais. Paralelamente a este enfoque, também figura dentro do objetivo geral, contribuir com desenvolvimento (e respectivas caracterizações) de recursos inovadores em termos de medição e controle dinâmico de fluxo de pó. Por conseguinte, pretende-se robustecer a aplicabilidade do PTA-P em operações avançadas, como manufatura aditiva e fabricação de estruturas compósitas. Possibilidade de fornecer dados de consumo de pó a sistemas de gerenciamento inteligentes na indústria 4.0, além de aumento da eficiência deste processo e flexibilidade em estratégias de adição de consumíveis, também podem tornar-se frutos dos desdobramentos deste trabalho.

2.1.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral desta tese de doutorado, descrito na sessão anterior, será necessário investir sobre cada um dos objetivos específicos elencados a seguir.

Quanto ao desenvolvimento de um sensor de fluxo de pó adequado para integração a sistemas de soldagem PTA-P:

- Assimilar conhecimento sobre medidores centrífugos de particulados e conceber instrumento compatível com perfis de fluxo de alimentação típicos do processo PTA-P;
- Caracterizar propriedades metrológicas em termos de limites, comportamento estático, comportamento dinâmico e erro do sinal de medição;
- Investigar possíveis influências do arco elétrico, de parâmetros de alimentação e de condições de instalação sobre o sinal do sensor;
- Averiguar prováveis influências da atuação do sensor sobre o fluxo de pó.

Quanto às análises operacionais dos alimentadores de pó de Tambor e Esteira:

- Determinar a taxa mássica de alimentação de pó em função da rotação dos elementos de dosagem, usando materiais de diferentes morfologias, granulometrias e propriedades de magnetização;
- Verificar possíveis influências causadas pela vibração do motor de acionamento dos ADP's sobre a taxa de alimentação de pó;
- Monitorar continuamente taxa mássica de alimentação, durante consumo total do carregamento de pó contido nos ADP's;
- Investigar influências provocadas pela variação dos níveis de vazão de gás de arraste sobre a taxa mássica de alimentação de pó;
- Analisar comportamento de fluxo de partículas expelido pelos ADP's em regime de alimentação;

 Realizar operações práticas de soldagem adequadas a avaliações da qualidade de alimentação dos ADP's.

Quanto ao desenvolvimento de uma válvula para controle dinâmico de fluxo de pó:

- Caracterizar sua performance como válvula proporcional para desvio contínuo de fluxo de pó;
- Determinar o efeito causado na taxa mássica de alimentação de pó em função de condições de instalação;
- Averiguar o limite máximo de frequência de operação, dentro da faixa de aplicação do processo PTA-P.

2.2 JUSTIFICATIVAS

Com mais de 40 anos dedicados a contribuições científicas dentro da esfera dos processos de soldagem a arco, o LABSOLDA vem, progressivamente, conquistando posição de referência a nível internacional. Entre diversos outros aspectos, o referido laboratório também figura como plataforma propícia para contemplação de um panorama global, em termos de carências e soluções para soldagem. Dentro de tal perspectiva, a divulgação e disponibilização de tecnologias e know-how em território nacional, por parte do LABSOLDA, vem despertando interesse de indústrias brasileiras pelo processo PTA-P. Neste sentido, fabricantes de parafusos para extrusão, de punções de prensas e de martelos, tem adotado o PTA-P em linhas industriais, desenvolvido projetos ou, ao menos, solicitado demonstrações. Entretanto, adaptação de tal processo de soldagem às aplicações industriais, habitualmente, implica em desenvolvimento acerca de procedimentos e equipamentos. Os fatos descritos decorrem de emergentes desafios que costumam, naturalmente, contrapor resultados satisfatórios imediatos. Contudo, além das atuais tendências de adoção do PTA-P pela indústria mecânica nacional, o processo citado mantém função estratégica como ferramenta científica, colaborando em pesquisas metalúrgicas. Neste caso, o uso de consumíveis em forma de pó por parte do PTA-P, favorece obtenção de novas ligas, como produto da solda de misturas experimentais. Devido a atuação do LABSOLDA, também nesta frente de desenvolvimento, é sabido que ainda persistem uma série de dificuldades. A maioria delas reside em aspectos de alimentação de pó, visto que os ADP disponíveis enfrentam sérias complicações, ao operarem com consumíveis experimentais.

A série de limitações supracitadas compõe a força motriz que impulsiona a realização desta tese de doutorado. Nos diversos cenários descritos, as contribuições propostas figuram como fundamentais ao avanço e aperfeiçoamento das tecnologias de alimentação, medição e controle de consumíveis em pó para soldagem. Em decorrência disto, as colaborações do presente trabalho podem favorecer a ampliação dos horizontes da pesquisa científica sobre a soldagem PTA-P, além de agraciar o mercado nacional com novos recursos tecnológicos na área da soldagem.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E TECNOLÓGICA

Este capítulo aborda toda a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento desta tese de doutorado. No que tange à soldagem PTA-P, o texto discorre sobre seus aspectos primordiais (aprofundando-se no que diz respeito ao sistema de alimentação de pó), além de discursar sobre aplicações deste processo. Naturalmente, maior atenção e detalhamento sobre dosagem, transporte e características dos consumíveis serão priorizados nesta parte do trabalho. Neste âmbito mais específico, explanações sobre limitações operacionais de dispositivos de alimentação de pó, assim como carência de recursos metrológicos serão também comentadas. Adicionalmente, ainda dentro neste contexto, informações igualmente pertinentes ao desenvolvimento desta tese, quanto a tecnologias de acionamento por motores de passo e motores DC, encerrarão o capítulo.

3.1 TÓPICOS PRIMORDIAIS DO PROCESSO PTA-P

Esta seção aborda o processo PTA-P em termos de sistema de soldagem, com foco na tecnologia de alimentação de consumíveis de solda. Também discorre sobre suas aplicações, levando em consideração seu emprego industrial e seus propósitos científicos.

3.1.1 Aspectos Gerais de um Sistema de Soldagem PTA-P

Dentre os processos a arco que, por sinal, abrangem a maioria das aplicações da soldagem na indústria, o processo TIG (*Tungsten Inert Gas*) compreende porção apreciável. Sua nomenclatura baseia-se no livre estabelecimento do arco voltaico, entre a extremidade de um eletrodo de tungstênio (não consumível) e a peça de trabalho (envolto por uma atmosfera de gás inerte). Baseado no TIG, foi concebido o processo de soldagem PAW (*Plasma Arc Welding*), também chamado somente de Plasma. Tal denominação refere-se, fundamentalmente, à restrição dimensional do arco voltaico, objetivando aumentar a concentração da fonte calorífica.

Por sua vez, o processo de soldagem PTA-P consiste em uma variação do processo de soldagem Plasma, na qual há adição de material em forma de pó. A sigla PTA é usada para abreviar sua nomenclatura em inglês, *Plasma Transferred Arc*. Uma vez havendo outra variação da soldagem Plasma que aplica o consumível em forma de arame, a literatura sugere a sigla PTA-A para esta variante, enquanto atribui PTA-P para a versão Plasma alimentada com Pó [4].

A Figura 3.1 relaciona os componentes básicos do sistema de soldagem PTA-P às características construtivas da tocha, cuja representação em corte revela sua arquitetura. Com relação à tocha, são representados o Eletrodo (de tungstênio e não consumível), o Bico Constritor e o Bocal de Gás (de proteção). Contudo, o Bico Constritor é a peça que suporta a essência do referido processo. Seu papel fundamental é concentrar o arco voltaico (chamado também de arco principal, como mostrado na figura), obrigando-o a estabelecer-se entre o eletrodo e a peça através de um canal circular de dimensões restritas, chamado orifício constritor. Como efeito, nos processos de soldagem Plasma, o arco apresenta uma coluna com forma aparentemente cilíndrica, diferente do arco TIG, por exemplo, que tende a apresentarse em forma de sino ou cone.

Seguindo a análise da Figura 3.1, uma fonte de corrente contínua de alta potência ligada ao Eletrodo (negativo) e peça (positivo) estabelece a diferença de potencial para manutenção estável do arco principal durante o processo. Entretanto, a ignição deste exige auxílio, uma vez que o eletrodo se encontra confinado no interior o Bico Constritor e impede um contato físico. O artifício mais utilizado é o Arco Piloto. Consiste em um arco auxiliar estabelecido entre o Eletrodo (negativo) e o Bico Constritor (positivo). É obtido pela ação sequencial de um ignitor de alta frequência e uma fonte de corrente contínua de baixa potência. Contudo é necessário a presença do Gás Plasma. Trata-se de um fluxo de gás inerte proveniente de uma fonte, com vazão controlada por uma válvula. Sua passagem entre o Eletrodo e o Bico Constritor favorece seu estabelecimento e, principalmente forma uma coluna de gás ionizado entre o Eletrodo e a Peça, gerando uma via eletrocondutora para ativar o arco principal. O Gás de Proteção, proveniente de uma fonte de gás e regulado por uma válvula de vazão (também representados na Figura 3.1), flui entre o Bocal de Gás e o Bico Constritor, formado uma atmosfera inerte para imersão do Arco Principal e proteção da poça de fusão.



Figura 3.1- Aspectos gerais de um sistema de soldagem PTA-P.

Fonte: Elaboração própria.

O ato de forçar a concentração do arco por restrição dimensional impõe severo aquecimento ao bico constritor. Portanto, para manter a temperatura sob controle, este possui galerias internas destinadas à circulação de água. A função de arrefecimento é realizada pela Unidade de Refrigeração composta, basicamente, por um sistema de bomba e radiador.

O aporte de consumível no processo PTA-P é administrado por um dispositivo chamado ADP (Alimentador de Pó). Basicamente é, como será detalhado mais adiante nesta fundamentação teórica, constituído de um reservatório de pó sob o qual um mecanismo de controle de dosagem opera enviando partículas para a tocha em forma de um fluxo. A atmosfera interior do ADP também é formada por gás inerte, proveniente de uma fonte de gás com vazão controlada por uma válvula. Além expurgar o ar atmosférico do sistema de alimentação, o Gás de Arraste, como é chamado, exerce principal função de transportar as partículas de pó até a tocha de soldagem. A esta, o ADP é conectado por uma mangueira, chamada linha de transporte pneumático, dando acesso às partículas aos canais de alimentação de pó presentes no Bico Constritor.

3.1.2 Adição de Consumíveis no Processo PTA-P

Em relação à magnitude da taxa de alimentação de pó, o PTA-P pode ser classificado como Micro PTA (MPTA), PTA e High Power PTA (HPTA) [16]. Em relação ao MPTA, envolve taxas de alimentação de até 0,5 kg/h. Já o PTA, considerase capaz de abranger cerca de 5,0 kg/h. Por fim, no que tange ao HPTA, é possível ultrapassar mais de 20 kg/h.

A alimentação de pó (carreado por gás) no processo PTA-P apresenta, habitualmente, os aspectos ilustrados na Figura 3.2. Como mostra o item (a) da Figura 3.2, o material é expelido pelos canais de alimentação situados no Bico Constritor, formando jatos que se interceptam em um ponto focal a uma distância média da face do bico [1]. Este foco corresponde a uma região interior à coluna do arco e rente à poça de fusão. Nesta zona as partículas são aquecidas e se precipitam sobre a poça, concluindo, assim, a alimentação de material na soldagem PTA-P. Esta precipitação foi filmada em laboratório, de modo que um instante deste filme é mostrado no item (b) da Figura 3.2.
Figura 3.2 - Características da adição de pó no PTA-P: a) Encontro dos jatos de pó expelidos da tocha; b) precipitação de partículas no momento da adição do material à poça



Fonte: a) Silva [1]; b) elaboração própria.

Em aplicações mais singulares, como casos de adição simultânea de diferentes consumíveis, ou parametrizações divergentes entre jatos de alimentação, podem ser usados mais de um ADP durante o processo. Contudo, para que isto seja possível, é necessário certo grau de independência entre os canais de alimentação da tocha PTA-P. A Figura 3.3 ilustra um tipo de tocha capaz de ser conectada a dois ADP's concomitantemente. Como mostrado na Figura 3.3 (a), dois grupos de canais de alimentação estão situados em duas câmaras semi-anulares distintas, embora se distribuam em simetria radial em torno do orifício constritor, de acordo com a Figura 3.3 (b). Desta forma, cada ADP pode ser ligado a uma destas câmaras, garantindo liberdade de parametrização entre os dois grupos, ou isolamento de materiais de diferentes naturezas até o ponto de ejeção.



Figura 3.3 - Tocha apta a operação com dois ADP's munida de dois grupos de canais independentes: a) detalhes internos; b) vista externa

Fonte: Servicerobotik KOMOROB [17].

3.1.3 Aplicações do Processo PTA-P

O processo PTA-P é utilizado, essencialmente, para confecção de revestimentos metálicos por soldagem. Tal tipo de aplicação se deve ao fato de os depósitos PTA-P tenderem a apresentar baixos níveis de diluição, além de acabamento superficial de regularidade geométrica superior a outros processos de soldagem a arco [18,19]. O bom acabamento superficial, fator favorável à redução da quantidade de material removido na conclusão dos serviços se deve, em grande parte, ao baixo nível de agitação da poça de fusão. Tal fenômeno, por sua vez, provém principalmente da alta estabilidade do arco principal aliado ao baixo grau de impacto mecânico do material de adição sobre a poça [1]. Quanto aos baixos níveis de diluição, colaboram com a conservação das propriedades metalúrgicas dos materiais de revestimento [1,3,4,20,21]. Esta vantagem advém do fato de que grande porção do calor é empregada para fusão das partículas de pó [22,23]. Em virtude disto, reduz-se a quantidade de energia imposta diretamente à peça, o que resulta em baixa penetração da solda.

As propriedades supracitadas não só estimulam o emprego da soldagem PTA-P em linhas de produção industriais pelo mundo. Também o capacitam como uma importante ferramenta de pesquisa no âmbito científico. Serão abordados exemplos de aplicações industriais e científicas nas próximas sessões.

3.1.3.1 Exemplo de Aplicação Industrial

Na indústria, o processo PTA-P é tipicamente empregado para revestir regiões de componentes mecânicos sujeitas a algum tipo de desgaste. Normalmente, a decisão de adotar o PTA-P baseia-se, além de requisitos de diluição e regularidade geométrica, na disponibilidade do material de adição e necessidade de automação do processo de produção. Um exemplo de aplicação remete ao caso da Indústria Mecânica Ruiz Ltda. Dentre seus produtos, a referida empresa fabrica roscas (parafusos transportadores de material em extrusoras de plásticos). As etapas finais da fabricação de tal peça compreendem revestimento da crista da rosca aplicando a liga STELLITE6® (por soldagem), além de posterior usinagem visando recuperação do perfil geométrico do topo. Anteriormente, a liga era depositada por meio de soldagem TIG manual, empregando consumível em forma de vareta. A adoção de tais métodos foi influenciada pela maior disponibilidade da tecnologia e do consumível no mercado brasileiro. Entretanto, limitações inerentes da soldagem manual associadas à qualidade e produtividade levaram o fabricante a buscar melhorias. Neste contexto, pesquisas empreendidas pelo LABSOLDA sobre o processo PTA-P vêm disponibilizando recursos em termos de procedimentos e equipamentos a nível nacional. Diante da disponibilidade de tecnologia brasileira, a Indústria Mecânica Ruiz pode aperfeiçoar sua produção e seu produto. A adoção de um processo de soldagem mais adequado à aplicação, automatizado e com consumíveis de igual facilidade de aquisição.

A Figura 3.4 ilustra as fases finais de fabricação de um parafuso de extrusora. Na Figura 3.4 (a) é mostrado o aspecto do revestimento da rosca com STELLITE 6. Tal recobrimento foi obtido por procedimento de soldagem PTA-P, desenvolvido no LABSOLDA. Ainda no próprio LABSOLDA, foi feito ensaio de Raios X, como exposto pela Figura 3.4 (b). Por fim, a Figura 3.4 (c) expõe o revestimento após retificado na Indústria Mecânica RUIZ.

Figura 3.4 – Aplicação industrial do processo PTA-P: a) Depósito de STELLITE6 sobre crista de rosca; b) Ensaio de Raio X; c) Revestimento após usinagem.





(c)

Fonte: Elaboração própria.

3.1.3.2 Exemplos de Aplicações em Pesquisas Científicas

Um dos aspectos mais típicos em que a soldagem PTA-P manifesta-se como importante ferramenta científica consiste no desenvolvimento de materiais. A

utilização do consumível de solda em forma de pó permite a fusão de misturas préformuladas de modo que se obtém, como resultado, o depósito solidificado da liga projetada. Posteriormente, a solda pode ser preparada para realização dos estudos metalúrgicos. Um exemplo pode ser dado pelo trabalho Desenvolvimento de Ligas para Revestimentos Por PTA Resistentes à Cavitação [3]. Tal pesquisa buscou propor formulações, levantar parametrizações de processo de soldagem e analisar o desempenho das ligas obtidas perante ao fenômeno de cavitação, com vistas à aplicação em pás de turbinas hidráulicas. A Figura 3.5 ilustra uma camada de revestimento, produzido por PTA-P com uma das ligas projetadas neste trabalho.

Figura 3.5 – Análise macrográfica de corpo de prova com deposição de uma camada de revestimento de liga experimental



Fonte: Ribeiro [3].

Outro exemplo de aplicação do PTA-P em pesquisas científicas, envolve produção de estrutura multicamada por meio da técnica de manufatura aditiva. Neste trabalho, foi avaliado o efeito de diferentes formas da liga Inconel 625, como consumível no processo PTA [5]. A Figura 3.6 mostra macrografias de estruturas compostas por 5 camadas, sendo em (a) utilizado o material em forma de arame e, em (b), o consumível em pó.



Figura 3.6 – Macrografias de estruturas multicamadas produzidas por processo PTA: a) Inconel 625 em arame; b) Inconel 625 em pó

Fonte: Cardozo [5].

A confecção das estruturas apresentadas viabilizou uma série de comparações em termos processuais e metalúrgicos. Muitas considerações basearam-se em análises microestruturais, como as apresentadas na Figura 3.7. Cada camada, de ambas estruturas, foi examinada individualmente, por meio de microscopia eletrônica de varredura.

Figura 3.7 – Micrografias por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) mostrando a microestrutura de cada camada depositada

	camada 1	camada 2	camada 3	camada 4	camada 5
Aram	е 20µm	dendrites*	- - - - - - - - - - - - - -	interdendritic region	20μm
Pó	<u>20μm</u>	20µm	<u>20μm</u>	20µm	<u>20µт</u>

Fonte: Cardozo [5].

3.2 PROPRIEDADES FUNDAMENTAIS DE MATERIAIS EM PÓ

As próximas sessões discorrem sobre as principais propriedades físicas apresentas pelos materiais em pó aplicados na indústria mecânica. Serão abordadas características como morfologia, granulometria e densidade aparente, além de aspectos sobre escoamento.

3.2.1 Aspectos Morfológicos

Os sólidos particulados disponíveis na indústria mecânica são, geralmente, obtidos por atomização ou trituramento. A Figura 3.8 ilustra tais métodos de fabricação de pós, associando-os ao aspecto físico das partículas que produzem. Existem outros processos de fabricação de pós, porém, com menor expressão no mercado.

Apresentada na Figura 3.8 (a), a atomização é o processo mais utilizado para produzir pós metálicos na indústria mecânica [24]. Consiste em atingir um fluxo de metal fundido com um jato de gás, água ou óleo sob pressão. Como efeito, o jato dispersa o fluxo de metal líquido. Este se espalha em forma de gotículas no interior de uma câmara, solidificando em suspensão e se precipitando sobre o fundo desta. A atomização pode produzir partículas com o formato aproximadamente esférico, como mostrado na Figura 3.8 (b). As ligas tradicionalmente aplicadas, via soldagem PTA-P, em fabricação e reparo de peças na indústria mecânica são, em sua maioria, constituídas exclusivamente de partículas atomizadas (esféricas) [3,4].

Para produção de pós de metais duros e frágeis, o trituramento (ou moagem), representado pela Figura 3.8 (c), é o processo mais econômico e mais indicado [24]. Esta técnica de fabricação usa rolos, martelos, mandíbulas ou bolas para fragmentar os metais a partir de blocos maiores. Como mostra a Figura 3.8 (d), os fragmentos produzidos por este processo são angulares e geralmente apresentam topologia escarpada. Atividades de pesquisas metalúrgicas que utilizam soldagem PTA-P como ferramenta para obtenção de novas ligas, normalmente, utilizam pós triturados em misturas experimentais [3].



Figura 3.8 – Processos de fabricação e morfologia de pós utilizados na indústria mecânica: a) processo de atomização; b) pó atomizado; c) processo de trituramento; d) pó triturado

Fonte: Alves [9].

3.2.2 Aspectos Granulométricos

Os pós tradicionalmente empregados no processo de soldagem PTA-P passam por um processo de padronização, em termos de distribuição e faixa granulométrica. A Figura 3.9 demostra graficamente os principais aspectos granulométricos de um pó padrão PTA-P. Na figura, uma quantidade é dividida em várias porções de diferentes faixas granulométricas. Na sequência, estas porções são novamente reunidas, com quantidades e tamanhos controlados, de modo a formar uma distribuição aproximadamente normal [25]. Neste exemplo, faixa granulométrica usada foi de 100 a 160 μm.



Figura 3.9 - Principais aspectos de distribuição granulométrica de pó padrão PTA-P

Na literatura são encontradas diferentes faixas granulométricas aconselhadas para a soldagem de ligas ferrosas por PTA-P [1]. Os diâmetros de partículas recomendadas variam de 45 μ m (mínimo) a 250 μ m (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). A literatura especializada também sugere 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 [26].

3.2.3 Considerações Sobre Densidade Aparente

A densidade aparente é uma das propriedades fundamentais dos materiais granulados. Define o volume real ocupado por uma massa de pó não compactada. Por esta razão, o termo densidade aparente está atrelado a procedimentos e aparatos normatizados, como mostrado em sequência na Figura 3.10 [9,27]. Consiste em deixar uma porção de pó fluir a partir de um funil chamado Funil de Hall (a), depositando-se no interior de um recipiente chamado Copo de Densidade (b). Após, o material excedente deve ser removido com auxílio de lâmina metálica (c) e, por fim, o conteúdo do copo é medido com uma balança de precisão (d). A densidade aparente, normalmente expressa em g/cm³, é obtida dividindo o valor da massa do conteúdo do copo pelo volume deste.

Figura 3.10 – Procedimento normatizado para determinação de densidade aparente: a) escoamento no Funil de Hall; b) Deposição no interior do Copo de Densidade; c) Remoção de excedente com lâmina metálica; d) pesagem do conteúdo



Fonte: adaptado de Alves [9].

A densidade aparente de um pó depende da densidade do material sólido (natureza química), faixa e distribuição granulométrica das partículas, morfologia das partículas, área e topologia superficial das partículas e, também, da disposição destas no corpo particulado. Geralmente, diminui com a redução do tamanho das partículas, decresce à medida em que a forma das partículas se torna menos esférica e mais irregular e, por fim, é reduzida com o aumento da rugosidade da superfície [27]. Um artifício frequentemente utilizado para controle da densidade aparente consiste na mistura de vários tamanhos de partículas [27].

3.2.4 Considerações Sobre Escoabilidade

Escoabilidade é um termo que se refere à capacidade de fluir que um pó apresenta. Tal fenômeno não pode ser expresso como um valor único ou índice, uma vez que não resulta somente das propriedades físicas (e químicas) das partículas que compõem o sólido particulado, mas também do equipamento usado para estocar ou manipular o material [28]. As próximas sessões discursam sobre regimes e defeitos de escoamento no interior de reservatórios de pó. Por fim, são abordados métodos de medição de escoabilidade de pós.

3.2.4.1 Regimes de Escoamento

Quando um silo é descarregado, dois padrões distintos de escoamento podem ocorrer: o escoamento em massa e o escoamento em funil [29]. Ambos padrões são ilustrados pela Figura 3.11.



Figura 3.11 - Regimes de escoamento: a) escoamento em massa; b) escoamento em funil

Todas as partículas contidas no silo se movem durante a descarga, quando ocorre o escoamento em massa, como mostrado à esquerda da figura. Este regime

Fonte: Schulze [29].

de escoamento é, geralmente, o mais desejado, uma vez que reflete boas condições de operação. Normalmente é fruto de um reservatório bem projetado, operando com pó atomizado (partículas esféricas) e faixa e distribuição granulométricas padronizadas.

Já no escoamento em funil, representado na Figura 3.11 à direita, somente a porção alinhada com a saída do reservatório entra em escoamento, enquanto a porção lateral permanece estagnada até que as partículas sejam expostas à superfície livre. Representa uma condição de escoamento mais problemática, em comparação ao escoamento em massa, sendo mais susceptível à uma interrupção espontânea (defeito de escoamento). Pode ocorrer em reservatórios quando o alimentador opera com misturas de pós atomizados e triturados, ou somente triturados, os quais tendem a apresentar escoabilidade reduzida.

3.2.4.2 Defeitos de Escoamento

Durante a descarga, defeitos de escoamento como o arco e o caminho de rato podem acontecer. Tais interrupções de fluxo de pó estão representadas na Figura 3.12.





Fonte: ASM Handbook [24].

Um arco, ilustrado na Figura 3.12 (a), também chamado de cúpula ou ponte, é uma obstrução que se forma logo acima do canal de descarga. Neste caso, as partículas se mantém coesas, impedindo a queda uma das outras e suportando o peso de todo o material restante. Já o caminho de rato, representado na Figura 3.12 (b), caracteriza-se por um defeito em forma de canal vertical que se estende da superfície do material estocado até o canal de descarga do silo. Tal canal é formado pelo esvaziamento da coluna acima do canal de descarga, sendo que, o restante do material permanece estagnado no reservatório até que um agente externo provoque uma avalanche [30].

3.2.4.3 Métodos de Medição de Escoabilidade

Os métodos mais práticos para estimar a escoabilidade de sólidos particulados baseiam-se na medição do ângulo de repouso (ϕ_r), ou de empilhamento. É definido pelo ângulo (agudo) formado entre o plano horizontal e a superfície livre de uma pilha de pó, resultante da organização das partículas frente à ação da gravidade. Basicamente, existem três principais métodos gravitacionais para formação do ângulo de empilhamento, sendo eles o método da injeção, da descarga e o método da inclinação [31]. A Figura 3.13 exibe representações de cada um deles.



Fonte: Powder Technology Handbook [31].

No método da injeção, representado na Figura 3.13 (a), o pó é cuidadosamente derramado através de um funil a uma altura fixa, até que o ápice da pilha formada pelo pó atinja a ponta do funil. O ângulo de repouso ϕ_r é formado entre o plano horizontal do palanque e a superfície da pilha formada sobre este. Já no método da descarga, representado na Figura 3.13 (b), uma caixa retangular (com fundo plano) é preenchida com pó, antes de um canal (de descarga) da sua base ser liberado. O ângulo de empilhamento ϕ_r se forma entre o plano do fundo da caixa e a superfície inclinada do pó remanescente em seu interior. Finalmente, no método da inclinação, representado na Figura 3.13 (c), um tubo com as extremidades seladas é preenchido com pó até a metade do seu volume total e deitado sobre uma superfície plana horizontal. Sobre esta superfície, o cilindro é rolado até que o pó exiba seu ângulo máximo com o plano horizontal. Este ângulo máximo é o ângulo de repouso ϕ_r .

O ângulo de empilhamento ϕ_r , embora não represente um valor absoluto de escoabilidade, pode servir como medida comparativa. Neste sentido, quanto menor a escoabilidade do pó, mais ϕ_r se aproximará de 90°. Da mesma forma, quanto maior a escoabilidade do pó, mais ϕ_r se aproximará de 0°. Assim sendo, por meio da determinação do ângulo de repouso ϕ_r , é possível afirmar que um pó possui menor ou maior escoabilidade em relação a outro (desde que se use o mesmo método de medição).

Outra aplicação para a medição do ângulo de repouso remete ao fato de que este reflete a mínima inclinação que determinado particulado necessita para escoar. Tal recurso foi adotado em um trabalho de desenvolvimento de ligas metálicas via soldagem PTA-P, cujas misturas experimentais envolveram porções de pós triturados [3]. Devido à escoabilidade inapropriada de tais misturas experimentais no reservatório do ADP, a alimentação das soldas era constantemente interrompida por defeitos de escoamento. Como solução, foi medido o ângulo de repouso de tais misturas e, o valor resultante, foi usado no projeto de uma nova tremonha, com inclinação de funil mais adequada à alimentação das misturas experimentais. A Figura 3.14 apresenta a medição do ângulo de repouso da pilha de pó, formada por uma mistura experimental formulada no referido trabalho.



Figura 3.14 – Medição do ângulo de empilhamento de mistura experimental de pós

Fonte: Ribeiro [3].

3.3 FUNDAMENTAÇÃO TECNOLÓGICA SOBRE ADP'S

Esta seção aborda, não somente a integração dos ADP's ao sistema completo de alimentação, mas, também, os aspectos tecnológicos dos principais elementos que integram os alimentadores de pó.

3.3.1 Sistema de Alimentação e Alimentador de Pó

O ADP faz parte do sistema de alimentação de pó, o qual também é constituído por uma fonte de gás de arraste e uma válvula de controle de vazão deste, além da própria tocha de soldagem. A Figura 3.15 esquematiza os componentes do sistema de alimentação de pó e suas interações mecânicas.

O cilindro é a fonte de gás de arraste, geralmente argônio, que realiza o transporte das partículas do ADP para a tocha PTA-P. A válvula de vazão realiza o controle (válvula microcontrolada) de fluxo de gás de arraste, uma vez que a estabilidade do processo é sensível a vazão deste. O ADP, por sua vez, é dotado de um reservatório, cuja função é comportar e escoar o pó necessário à operação de soldagem. Possui também um mecanismo manipulador (motorizado), o qual dosa o

pó com vazão adequada ao processo. O gás de arraste é inserido tanto no reservatório quanto no mecanismo manipulador, objetivando a equalização da pressão interna do ADP e, primordialmente, o transporte das partículas de pó. Enfim, dispõem de uma linha de transporte (mangueira), a qual direciona as partículas de pó para a tocha PTA-P, com auxílio do gás de arraste. As próximas sessões discorrem sobre aspectos relacionados aos três principais elementos dos alimentadores de pó.



Fonte: Elaboração Própria.

3.3.2 Aspectos Mecânicos dos Principais Elementos dos ADP's

As seções a seguir discorrem sobre três elementos básicos, presentes em qualquer alimentador de pó. Por conta disto, as abordagens abrangem aspectos em relação a reservatórios, mecanismos manipuladores de pó e transporte pneumático.

3.3.2.1 Aspectos Sobre Reservatórios

Os reservatórios, ou silos, são recipientes com a finalidade de estocar o sólido particulado, além de escoá-lo com determinado padrão em direção ao mecanismo de manipulação de pó. Perante estas premissas, o tipo de reservatório deve ser adotado de acordo com o padrão de escoamento desejado, levando em consideração as propriedades do material com o qual irá operar. Na maioria das vezes, os reservatórios

são projetados para fornecerem escoamento em fluxo de massa, visto este ser um regime menos susceptível a defeitos de escoamento.

A Figura 3.16 ilustra, de forma esquemática, dois tipos de reservatórios compatíveis com fluxo de massa. Na figura é possível distinguir que, em termos gerais, um reservatório é composto por uma parte chamada cilindro e, por outra, chamada tremonha. O cilindro, embora não necessariamente apresente este formato, consiste na parte superior do reservatório. Em seu topo se situa, normalmente centralizado, um canal de entrada, destinado ao carregamento de pó. O dimensionamento do cilindro determina a capacidade de estocagem do equipamento. A tremonha, localizada na parte inferior, consiste em uma estrutura capaz de direcionar e distribuir o fluxo do particulado sobre o mecanismo manipulador do alimentador. Devido a isto, os principais parâmetros de uma tremonha correspondem ao ângulo de inclinação de suas paredes, além do formato e dimensões de seu canal de descarga.

Como também mostrado na Figura 3.16, os dois tipos principais de tremonha são as cônicas, que operam com fluxo simétrico em torno do eixo, e tremonhas em forma de cunha, nas quais ocorre o fluxo no plano. À esquerda na figura é mostrado um reservatório de tremonha cônica. Possui parede com inclinação α_c e, por consequência, canal de descarga circular (de diâmetro B). Os ADP's comerciais conhecidos adotam este tipo de reservatório. Essencialmente, por se tratar de uma estrutura de fabricação simplificada, eficiente na garantia de fluxo de massa de materiais de alta escoabilidade, como pós tradicionais para PTA-P. Já à direita, na figura, é ilustrado um reservatório de tremonha em forma de cunha. Apresenta paredes planas, onde duas delas apresentam ângulo de inclinação α_p. Como resultado, pode fornecer canal de descarga alongado, geralmente retangular, como delimitado na figura pelas dimensões B_p e L [32]. Este tipo de reservatório representa uma opção para obtenção de fluxo de massa, em operação com materiais de mais baixa escoabilidade. Em função de maior liberdade de dimensionamento do canal de descarga, permite adequação para operação com consumíveis compostos por misturas experimentais, por exemplo.



Figura 3.16 – Reservatórios para escoamento em massa: à esquerda silo com tremonha cônica; à direita silo com tremonha em forma de cunha

3.3.2.2 Aspectos Sobre Mecanismos Manipuladores

O mecanismo manipulador de um ADP é o elemento responsável pela dosagem e dispensa do pó. Por conta destas funções, deve fornecer controle estável da porção de consumível enviada ao processo, além de dispensá-la da forma mais contínua possível. A nível de projeto, o mecanismo manipulador escolhido para integrar um dispositivo de alimentação de pó deve, necessariamente, ser compatível com o reservatório adotado pelo equipamento [32]. A Figura 3.17 retrata compatibilidade geométrica entre mecanismos dosadores e respectivos reservatórios, para dois conceitos de ADP's.

No caso dos consumíveis tradicionalmente empregados no processo PTA-P, devido aos elevados níveis de escoabilidade, apresentam fluxo de massa em reservatórios de tremonha cônica. Por conta disto, são encontrados mecanismos manipuladores de diversos tipos integrando ADP's comerciais, já que a maioria dos mecanismos são compatíveis para operação conjunta com reservatórios de tremonha cônica. Contudo, os mecanismos manipuladores de pó, de uso mais recorrente em alimentadores comerciais para soldagem PTA-P, são os de Parafuso Horizontal [4], de Disco Horizontal [33] e de Tambor [1,9]. Este último, abordado neste trabalho de forma mais detalhada no próximo capítulo, corresponde ao modelo utilizado atualmente na bancada PTA-P do LABSOLDA. Como apresentado pela Figura 3.17 (a), é composto por um tambor que revoluciona verticalmente abaixo de uma tremonha cônica. A pilha de pó, formada entre a superfície do Tambor e o Canal de Descarga, origina determinado volume de material por revolução.



Fonte: Alves [11].

Já no caso de materiais alternativos, como misturas experimentais e ligas de padrões morfológicos e granulométricos compatíveis com outros processos, o fluxo de massa é conseguido somente por meio de reservatórios com características mais complexas, como os de tremonha em forma de cunha, com canal de descarga mais alongados (de maior área). Por conta disto, um ADP desenvolvido em trabalho recente, dedicado à operação com pós alternativos, adotou mecanismo manipulador de Esteira Transportadora [11]. Tal princípio mecânico, semelhante ao Tambor, é indicado como mais apropriado para operar com reservatório de tremonha em forma de cunha [32]. Como representado na Figura 3.17 (b), a Esteira, por possuir região plana, é capaz de estabilizar a pilha de pó que, por sua vez, se deposita ao longo de todo o comprimento do Canal de Descarga alongado. Da mesma forma que o Tambor, tende a originar determinado volume de material por revolução.

3.3.2.3 Aspectos Sobre Transporte Pneumático

A transferência das partículas de pó, do ADP para a tocha de soldagem é realizada com auxílio de uma técnica chamada fluidização. A fluidização consiste em induzir uma porção de partículas sólidas a se comportarem como um líquido, podendo fluir ou se mover entre si. Consegue-se isto fazendo um fluido atingir as partículas, com velocidade suficiente para produzir força de arraste, igual ou superior ao peso dos fragmentos, suspendendo-os e movimentando-os.

Já um regime de fluidização corresponde, basicamente, a como um grupo de partículas se move, se agrupa e interage com o recipiente sob a ação da vazão do gás de arraste. Um leito de partículas pode ser operado em diversos regimes de fluidização. A Figura 3.18 traz representações de regimes de fluidização em função do aumento da velocidade do gás. Contudo, o regime de fluidização depende não só da velocidade do gás, mas, também, do diâmetro e densidade das partículas, além da densidade do gás de fluidização [34,35]. O regime de fluidização com maior velocidade de gás de arraste é chamado transporte pneumático. Este é o regime adotado no transporte de partículas de pó do ADP para a tocha de soldagem no processo PTA-P. Tipicamente, o sistema de alimentação emprega mangueiras de 4,0 mm de diâmetro interno e vazões de gás de fluidização (arraste) entre 2,0 e 5,0 l/min.



Figura 3.18 – Regimes de fluidização em função do aumento da velocidade do gás

Aumento na velocidade do gás

Fonte: Adaptado de Lacerda [34].

3.4 LIMITAÇÕES DO PROCESSO DE SOLDAGEM PTA-P

Uma das maiores referências nacionais em PD&I no âmbito dos processos de soldagem a arco, o LABSOLDA (laboratório de soldagem da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC), vem empreendendo estudos científicos acerca do processo PTA-P há mais de 15 anos [1,4,9,11]. Neste ínterim, o LABSOLDA acumulou *know-how* e desenvolveu tecnologias suficientes para que o Brasil possa fabricar sistemas PTA-P completos, com dependência mínima do mercado exterior. Atualmente, as atividades laboratoriais ainda abrangem desenvolvimento de procedimentos de soldagem para novas aplicações dentro país, além de avanços tecnológicos em equipamentos que compõem o sistema de soldagem PTA-P. Tais atuações mostramse sempre necessárias, uma vez que as aplicações laboratoriais quase sempre põem à prova os recursos utilizados. Neste contexto, a maioria das dificuldades enfrentadas pelo processo PTA-P reside na adição de consumível, provocadas, por sua vez, por limitações inerentes dos componentes que formam o sistema de alimentação de pó.

Sendo assim, as próximas sessões discorrem sobre uma série de limitações demonstradas, essencialmente, pelo ADP utilizado.

3.4.1 Sensibilidade à Vibração do Motor de Passo

Durante operações de calibração de um modelo de ADP de Tambor, a curva obtida apresentou uma série de anomalias, incomuns para o tipo de alimentador em questão. Tal curva é apresentada no gráfico da Figura 3.19.



Fonte: Elaboração própria.

Em primeira análise, a curva não apresenta o típico comportamento linear de taxa de alimentação em função da rotação do Tambor. Além disto, o nível de rotação de apenas 1 rpm forneceu taxa de alimentação acima de 1,7 kg/h (fluxo mássico obtido, normalmente, acima de 12 rpm). Semelhante comportamento se mostra de extrema inconveniência para parametrização do processo, dificultando o alcance do equilíbrio entre quantidade de material de adição e calor o que, por consequência, restringe flexibilidade para obtenção de resultados. Ainda analisando o gráfico, é possível observar outro fenômeno incomum. Tal fenômeno corresponde à formação de picos, um menor em 1 rpm e outro maior em 2 rpm. Logo após estes pontos a curva

decai, formando os trechos assinalados na figura. Nestes trechos, é perceptível que a taxa de alimentação cai em função do aumento da rotação do tambor, o que representa total incoerência operacional (perda de controle da taxa de alimentação).

Em ocasião destes ensaios, foi observado, primeiramente, que o ADP estava sob efeito de vibração, cuja fonte correspondia a seu motor de passo. De fato, foi verificado que um recurso inibidor de vibrações, disponível em seu dispositivo de acionamento, estava desabilitado. Embora simples de ser resolvido, o fato ocorrido acabou por revelar uma dependência do ADP de Tambor, por parte deste recurso de acionamento. Neste sentido, como não existem estudos que caracterizam o comportamento dos fenômenos induzidos pela vibração, nem mesmo suas respectivas naturezas, o presente trabalho acabou por inserir em seu escopo.

3.4.2 Variações na Altura de Cordões de Solda

Recentemente, no LABSOLDA, está sendo desenvolvido um procedimento de soldagem PTA-P para deposição da liga Stellite 6®, detalhado na Figura 3.20. O objetivo consiste em preencher bordas chanfradas de peças quadradas constituídas, por sua vez, de aço AISI 1045. Como principal requisito, as soldas devem apresentar geometria e volume mínimos e suficientes para que, em posterior usinagem, seja possível obter o perfil (área escura) ilustrado na Figura 3.20 (a), com o mínimo possível de remoção (perdas) de material. Perante esta premissa, foi adotada a utilização de um tarugo cilíndrico de cobre como uma espécie de backing, formando uma junta com o chanfro das bordas da peça. Tal junção é mostrada na Figura 3.20 (b), incluindo a ponteira de referência. Este artefato, projetado e fabricado no próprio LABSOLDA via impressão 3D para ser conectada ao bocal de gás da tocha, foi usado para auxiliar no posicionamento preciso da tocha de soldagem sobre a junta. O principal intuito deste método reside em executar a solda nesta junta sem que haja a fusão do cobre. Deste modo, após a remoção do backing, espera-se obter um cordão com forma e volume próximos do perfil final, com níveis mínimos de sobremetal a ser removido.



Figura 3.20 – Método de preenchimento de bordas chanfradas de peça quadrada: a) projeto do perfil da borda após usinagem; b) junta formada entre peça e backing de cobre

Fonte: Elaboração própria.

O procedimento adotado mostrou-se promissor para o preenchimento das bordas com Stellite 6, via soldagem PTA-P. Como pode ser visto na Figura 3.21 (a), os depósitos apresentaram acabamento superficial regular em toda sua extensão. A remoção do backing foi possível nas quatro bordas, o que conferiu o perfil curvo da face interior das soldas. Entretanto, foram observadas variações na altura do reforço dos cordões que preenchem as bordas. Tais oscilações são mostradas na Figura 3.21 (b), apontadas com setas amarelas. Como pode ser visto, as variações se manifestam de forma ondulada e, aparentemente, em intervalos regulares. Para esta aplicação, tais variações na altura do reforço são prejudiciais, uma vez que dificultam a otimização do dimensionamento de sobremetal.

As suspeitas recaem sobre a alimentação da solda por parte do ADP de Tambor, embora tenham sido detectadas estas irregularidades em outras aplicações do processo PTA-P no LABSOLDA.



3.4.3 Magnetização de Partículas no Interior do ADP de Tambor

Outra atividade, também objetivando o desenvolvimento de uma liga de alta resistência à cavitação (com vistas à aplicação em turbinas hidráulicas), empregou um consumível de solda à base de ferro. Tal pó, atomizado com água, era composto de partículas de formas variadas, sendo as maiores, aproximadamente esféricas, enquanto as menores, apresentavam topologia irregular. Estudos em uma amostra do particulado indicaram que 47% das partículas apresentavam tamanho entre 45 e 150 µm, sendo que 9% eram menores e 44% eram maiores. Assim, tal material não apresentava concordâncias morfológicas e granulométricas com os padrões PTA-P. Contudo, este consumível foi depositado via PTA-P por falta de alternativas.

As operações de deposição da liga mencionada foram dificultadas por uma série de entupimentos, os quais acabaram por comprometer a qualidade dos depósitos. Em busca de uma resolução para o problema, foi realizada uma inspeção visual através de uma escotilha presente no ADP de Tambor. A Figura 3.22 mostra as

condições visuais da região de formação da pilha sobre o tambor. De fato, no detalhe da figura é possível observar que não há formação da pilha de pó, indicando defeito de escoamento provocado por formação de um arco em algum ponto acima do canal de descarga do ADP. Outro trabalho reportou o mesmo fenômeno [1] e, embora não tenha investigado a natureza do problema, apontou a suspeita de magnetização do material. Tal hipótese se fundamenta em uma aparente orientação de partículas, semelhantes a limalhas imersas em um campo magnético, além do fato de consistir em um material à base de ferro (ferromagnético, portanto). O detalhe da Figura 3.22 também transmite a noção de ocorrência deste fenômeno.

Figura 3.22 – Escoamento interrompido por formação de arco e aderência de partículas no interior do ADP de Tambor



Fonte: Elaboração própria.

3.4.4 Dificuldades em Alimentação de Pós Alternativos

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

Entretanto, os materiais fornecidos pela empresa eram compostos por partículas de faixa e distribuição granulométrica discordantes dos padrões PTA-P. Em função disto, o desempenho do ADP foi comprometido, tornando a alimentação do processo problemática. A Figura 3.23 apresenta alguns aspectos do procedimento.

A principal tendência era a ocorrência de caminho de rato, como mostrado na Figura 3.23 (a). O entupimento por arco, na Figura 3.23 (b), passou a ocorrer em menor frequência, quando a alimentação foi forçada pela vibração do ADP com um dispositivo excêntrico improvisado, na Figura 3.23 (c). Ainda assim, os revestimentos foram concluídos com interrupções permanentes na alimentação, produzindo descontinuidades como a apresentada na Figura 3.23 (d).

Figura 3.23 – Alimentação problemática de pó alternativo com ADP de Tambor: a) escoamento interrompido por caminho de rato; b) escoamento interrompido por arco; c) dispositivo excêntrico improvisado; d) defeito no revestimento



(b)

Fonte: Elaboração própria.

Nesta ocasião o LABSOLDA decidiu empreender esforços para desenvolver um modelo de ADP capaz de alimentar materiais alternativos, sendo recorrentes as aplicações deste tipo de consumíveis no âmbito da pesquisa. Em um momento anterior, o laboratório já havia investido pesquisas sobre um protótipo de ADP baseado no princípio das válvulas rotativas, amplamente empregado na manipulação de grãos na indústria agrícola [9]. Embora tenha contribuído na época com maior facilidade na aplicação de materiais alternativos via soldagem PTA-P, o protótipo mostrou-se extremamente susceptível a travamentos [10], fator que prejudicou sua confiabilidade. Como produto da realização deste novo trabalho foi desenvolvido o ADP de Esteira [11]. A essência mecânica deste dispositivo corresponde, de fato, a uma versão primitiva do princípio do próprio ADP de Tambor.

3.5 ALIMENTAÇÃO DINÂMICA DE PÓ

As vantagens da pulsação em baixa frequência de energia em processos de soldagem a arco são conhecidas e se encontram consolidadas em diversas aplicações industriais. Esta técnica pode trazer vantagens processuais (desde controle da poça metálica em posições forçadas e redução de porosidade, até a aparência estética da solda [36]) e metalúrgicas (como refino de grão [37]). Contudo, os alimentadores existentes não oferecem recursos para realização de alimentação de pó de forma controlada e proporcional à corrente imposta no processo, como no caso do processo PTA-P, por exemplo.

3.5.1 Válvula Direcionadora de Pó

Nos trabalhos [1,12], foi concebido um protótipo de válvula proporcional para alimentação de pó no processo PTA-P com corrente pulsada. O protótipo, após passar por diversas adequações, resistiu a uma série de testes que indicaram vantagens relacionadas principalmente à eficiência do processo, uma das principais deficiências do processo referido.

O protótipo de válvula direcionadora de pó é ilustrado pela Figura 3.24. Possuía uma via de entrada de pó proveniente do ADP e duas vias de saída. Uma delas conectada à tocha de soldagem e outra ligada ao silo do ADP. No encontro entre as vias de entrada e saída havia um rotor, o qual possuía um canal de passagem. Assim, um motor de passo move o rotor em concordância com pulsos de corrente de soldagem, desviando o pó da via da tocha para a via do ADP de forma proporcional à energia imposta pelo processo.

Em função de aspectos inadequados de projeto, este protótipo não permitiu avanços no estudo da pulsação sincronizada de pó com corrente. O fato deste valerse de ajustes com interferência para conseguir desviar o pó de forma proporcional, criou problemas de funcionamento. Desgaste acentuado entre as partes de movimento em contato com pó e vazamentos subsequentes inutilizaram o mecanismo logo após os testes.



3.5.2 Rapid Powder Switch

Outro trabalho divulga uma solução semelhante voltada à alimentação dinâmica de pó em processos de revestimento por soldagem a LASER [15]. Trata-se do dispositivo *Rapid Powder Switch*, ou RPS. O referido atuador, ilustrado na Figura 3.25 (a) consiste em uma válvula de desvio de fluxo de pó, munida com mecanismo de acionamento pneumático. Adicionalmente, é informado que o ciclo de chaveamento é inferior à 200 ms. Contudo, não são fornecidos maiores detalhes sobre o projeto da referida válvula. Sua atuação permite apenas controle em modo On-Off,

liberando e interrompendo um fluxo de consumível com vazão pré-estabelecida. O uso do RPS permite alimentação intermitente, gerando depósitos com geometria controlada, como mostrado na Figura 3.25 (b).

Figura 3.25 - Dispositivo Rapid Powder Switch (RPS): a) Perspectiva do modelo em ambiente CAD; b) exemplo de aplicação com alimentação intermitente.



Material B

(a)

Fonte: Dickler [15].

A equipe de pesquisa aponta, como principais vantagens, praticidade em aplicações que envolvem mais de um tipo de consumível ou mais de uma forma de injeção de pó durante o processo. A Figura 3.26 ilustra tais vantagens processuais.



Figura 3.26 - Vantagens do Rapid Powder Switch (RPS): a) Revestimento composto por dois materiais; b) exemplo de aplicação em LASER Cladding.



(b)

3.6 MEDIÇÃO DE FLUXO DE PÓ

Um dos principais papéis da medição consiste na disponibilização de um valor que indique uma noção quantitativa do mensurando, em relação a uma unidade de medida. Conhecer a taxa de alimentação do processo de soldagem é fundamental, pois, deve ser usada para repetição de resultados, independentemente do tipo de equipamento empregado. Outro papel da medição, fundamental para 0 desenvolvimento tecnológico dos processos de soldagem, consiste no monitoramento das variáveis durante o processo. Um dos benefícios de monitorar a variável é a atuação sobre esta por meio de controle (malha fechada). Semelhante recurso é essencial para conceder alto grau de reprodutibilidade de resultados. Outro benefício se trata do monitoramento simultâneo de diversas variáveis do processo. Sistemas de aquisição para soldagem permitem, deste modo, acompanhamento do comportamento gráfico das variáveis, permitindo associá-las com aspectos de depósitos de soldagem, sejam características positivas ou negativas (defeitos).

Os equipamentos de alimentação de pó existentes que integram sistemas de soldagem PTA-P não contam com um sensor customizado, para medição da a taxa mássica de alimentação dos processos. Por conta disto, habitualmente, a vazão mássica tem sido estimada por meio de pesagem. Este método, além de não poder ser aplicado *online* ao processo, fornece curvas de calibração sensíveis a uma série de regulagens. Desta forma, a reprodutibilidade e o desenvolvimento dos processos tende a ser limitada pela dificuldade em controlar e associar os resultados de soldagem com o comportamento da taxa mássica. Pelo mesmo motivo, torna-se difícil caracterizar o comportamento dinâmico dos sistemas de alimentação, dificultando a seleção de um ADP em função das características do processo de soldagem.

3.6.1 Medição de Fluxo de Pó por Método Eletrostático

Os processos de soldagem que utilizam material de adição em forma de pó utilizam, geralmente, o método de transporte pneumático para enviar as partículas ao à fonte calorífica. Tal método tende a gerar energia eletrostática, em virtude do atrito entre as partículas, ou, entre elas e os componentes dos alimentadores com os quais entram em contato. A observação deste fenômeno na bancada do processo PTA-P do LABSOLDA instigou a execução de testes investigatórios sobre a possibilidade de utilizar energia eletrostática como sensor de fluxo de pó no referido processo [1,12]. Na primeira tentativa, o protótipo era formado por dois tubos de cobre em série, cada um conectado a um polo de uma fonte de corrente. Com este aparato, buscou-se a produção de um sinal proporcional ao fluxo de pó pela eletrificação das partículas no primeiro tubo e posterior descarga sobre o segundo (gerando uma corrente elétrica entre eles). Neste caso, embora tenha-se obtido um sinal de corrente influenciado pela vazão de pó, interferências como ruídos provenientes da rede elétrica e mesmo a presença das mãos do operador comprometeram a adoção deste protótipo para estudos. A constatação de que o sinal de resposta era similar mesmo sem alimentar o protótipo com fonte de corrente, levou à segunda tentativa. Desta vez, como mostrado na Figura 3.27, os tubos empregados eram constituídos de polímero impregnado com partículas condutoras.

Figura 3.27 – Protótipo para medição de fluxo mássico de pó por eletrificação de partículas em tubos impregnados



Fonte: Silva [1].

A intenção foi manter a condutividade destes sem que os mesmos pudessem funcionar como antenas (inibindo a influência de agentes externos). Com este protótipo obteve-se a geração de um sinal representativo do fluxo de pó, contudo houve saturação prematura da corrente, o que modificou a correlação entre as grandezas envolvidas.

3.6.2 Medição de Fluxo de Pó por Método LASER

Outra tecnologia que vem sendo utilizada para medição de fluxo de consumíveis particulados em processos de soldagem corresponde a método LASER. Um trabalho, desenvolvido na Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, produziu o aparato de medição descrito na Figura 3.28 [13]. A Figura 3.28 (a) ilustra o projeto em ambiente CAD, enquanto a Figura 3.28 (b) mostra o instrumento fabricado. Tal dispositivo foi concebido, essencialmente, para caracterizar parâmetros de fluxo como densidade, posição e diâmetro do foco de fluxo de alimentação, após saída do bico injetor de pó.



Figura 3.28 – Aparato de medição de fluxo de consumíveis em pó por método LASER para soldagem LASER

Fonte: Melo [13].

Embora tenha apresentado alta performance em medição de diversos parâmetros de alimentação de pó, o aparato não é capaz de operar durante o processo de soldagem. Foi concebido somente para caracterização de bicos injetores e respectivos fluxos, no intuito de qualifica-los para posterior procedimento de solda. Embora a tecnologia seja promissora para medição de consumível no PTA-P, o instrumento atual é incompatível com tal sistema de soldagem, além de não medir taxa de alimentação simultaneamente a execução do processo. Um possível desenvolvimento de sensor LASER de fluxo de pó deve, obrigatoriamente, levar em consideração a vulnerabilidade de semelhante tecnologia às condições hostis de soldagem, além dos altos investimentos em recursos humanos e financeiros.

3.6.3 Medição de Fluxo de Pó por Método Centrífugo

Dentre diversos outros métodos de medição de fluxo de sólidos particulados, chamam atenção, principalmente por sua simplicidade, os medidores de fluxo de massa centrífugos. Consiste, basicamente, em um aparelho composto por uma espécie de turbina (chamada Centrifugador) acoplada a um motor. Um modelo baseado no método centrífugo de medição é mostrado na Figura 3.29. Tal figura ilustra seu uso em um sistema de alimentação de grande porte, podendo representar aplicação em indústria agrícola (grãos) ou de polímeros, como sugere o fabricante [14].

No equipamento o particulado, movimentado por um mecanismo de Parafuso Horizontal, é induzido a escoar por uma calha. A calha, por sua vez, encaminha o fluxo do particulado para o interior do Sensor Centrífugo, onde o Centrifugador revoluciona em alta rotação, devido ação do motor. Um sistema de aquisição monitora as variáveis elétricas do motor, que se alteram de acordo com a quantidade de partículas que formam o fluxo. Neste sentido, quanto maior a taxa de alimentação do particulado, maior a carga imposta ao motor. O fabricante afirma que o sinal de medição corresponde ao fluxo mássico de material, atingindo níveis de repetibilidade em torno de 0,5%. Também declara que influências sobre o sinal de medição, relacionadas a tamanho dos grão e densidade aparente, são irrelevantes [14].



Figura 3.29 – Medidor centrífugo de fluxo de massa de sólidos particulados

Fonte: Centrifugal Feeder for Bulk Materials [14].

3.7 TECNOLOGICAS DE ACIONAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

São diversas as tecnologias que fundamentam os atuadores de sistemas mecânicos na atualidade. Neste contexto, os motores elétricos cobrem uma vasta gama de aplicações e, por consequência disto, apresentam arquiteturas variadas. Neste trabalho, foram adotados dois tipos de atuadores elétricos, sendo eles o Motor de Corrente Contínua (CC) com Escovas e o Motor de Passo.

3.7.1 Motor CC com Escovas

Em termos de aspectos construtivos, existem muitas variações entre os motores CC com escovas. Contudo, a classificação quanto à forma de produção do campo magnético figura como primordial. Segundo este quesito, dividem-se entre Motores de Fluxo Magnético Variável e Motores de Fluxo Magnético Constante. Este último será abordado a seguir, uma vez que sua tecnologia envolve conteúdo científico fundamental à compreensão desta tese.

O Motor CC com Escovas de Fluxo Magnético Constante é caracterizado, essencialmente, por seu estator ser constituído de ímã permanente. Dentro deste, revoluciona um rotor formado por uma série de bobinas montadas em torno do eixo. As extremidades das bobinas formam o comutador, região que mantém contato com as escovas, formando um mecanismo de energização do motor. Em relação ao funcionamento deste tipo de motor, basicamente, ocorre de acordo com a descrição subsequente [38].

A Figura 3.30 mostra que, ao conectar cada escova à um respectivo polo de uma bateria (fonte de corrente contínua), estas transmitem a corrente elétrica à bobina do rotor através do contato com o comutador. A combinação do sentido de circulação da corrente da bobina com a orientação do campo magnético do estator gera uma força que mantém o eixo em rotação. Como efeito, tem-se uma tensão induzida Ecc, uma vez que a rotação N da bobina provoca variação do fluxo magnético do estator ϕ que atua sobre si.


Figura 3.30 – Princípio de funcionamento de um motor de corrente contínua

Fonte: Funcionamento Motor CC [39].

A equação 3.1 sugere o relacionamento anteriormente descrito entre as grandezas envolvidas, acrescentando uma constante de proporcionalidade k que considera aspectos de projeto do motor. Importante salientar que, de acordo com esta equação, o valor da tensão induzida é diretamente proporcional à rotação do motor.

$$Ecc = k * N * \phi \quad (3.1)$$

Quando os motores CC são alimentados por fonte de tensão Vcc, a corrente se comporta de acordo com a equação 3.2. A partir desta é possível interpretar que, um acréscimo de carga ao eixo do motor aumenta a corrente fornecida pela fonte lcc. Tal efeito ocorre devido ao fato de que uma carga tende a reduzir a rotação. Assim, se a carga chega a parar o rotor, a parcela Ecc é zero e, por consequência, tem-se uma corrente de valor máximo.

$$Icc = \frac{Vcc - Ecc}{Zcc} \quad (3.2)$$

Já quando os motores CC são alimentados por fonte de corrente lcc, a tensão se comporta de acordo com a equação 3.3. Trata-se do mesmo modelo matemático

da equação 3.2, contudo, isolando-se a tensão Vcc. Neste caso, é possível deduzir que um acréscimo de carga ao eixo do motor reduz a tensão imposta pela fonte. Tal fato ocorre porque a carga tende a reduzir a rotação. Novamente, se a carga chega a parar o rotor, a parcela Ecc é zero e, por consequência, a equação retorna um valor de tensão Vcc mínimo.

$$Vcc = Zcc * Icc + Ecc$$
 (3.3)

3.7.2 Motor de Passo

O motor de passo ostenta aspectos construtivos singulares, embora apresente variações que originam diferentes tipos. Basicamente, constitui-se de um rotor composto por ímã permanente, além de um estator composto por bobinas que viabilizam formação de campo magnético girante. O tipo de motor de passo adotado neste trabalho é o híbrido bipolar, classificação referente às suas características construtivas e número de bobinas do estator. Este modelo confere alto desempenho em controle de velocidade e posição, conservando altos níveis de torque. Também oferece flexibilidade para a aplicação com diversas técnicas de acionamento. A Figura 3.31 associa a sincronização magnética entre o rotor e bobinas de um motor de passo (de ímã permanente) com a técnica de acionamento correspondente.

A maioria dos motores de passo são construídos para oferecerem um passo de 1,8°, ou seja, 200 passos para girar 360° (uma rotação completa). Neste caso, como mostrado na Figura 3.31 (a), o acionamento é chamado passo completo, uma vez que o polo do rotor se mantém alinhado com uma bobina por vez. Contudo, maiores resoluções de passo podem ser obtidas, dependendo do modo de acionamento. O acionamento em meio-passo, ilustrado na Figura 3.31 (b), consiste em energizar, alternadamente, uma e duas fases. Quando energizada uma fase, o dente do rotor se mantém alinhado com o dente do estator. Quando duas bobinas são energizadas, o rotor se equilibra em uma posição intermediária às duas bobinas energizadas, correspondendo ao meio-passo. Neste caso a resolução é dobrada, em detrimento de torque [40]. Por fim, o micro-passo, esquematizado na Figura 3.31 (c), é produzido energizando-se as bobinas em intensidades diferentes, fazendo com que o rotor se equilibre em posições divergentes do alinhamento dos dentes ou do meio

passo. Tal modo, além de aumentar até 100 vezes a resolução do acionamento, atenua vibrações causadas pela energização súbita das bobinas.

A manipulação de energia elétrica necessária para acionar um motor de passo é viabilizada por dispositivos eletroeletrônicos chamados *drivers*. Entretanto, métodos de acionamento como o micro-passo, somente são oferecidos por *drivers* dotados de tecnologia mais avançada. Outro recurso, disponível somente em *drivers* de alta performance é o modo *Smooth*, disponível na linha STR® da empresa Applied Motion Products. Consiste em uma técnica de acionamento baseada em energização e desligamento gradual e filtrado das bobinas, como representado na Figura 3.31 (d). Em métodos de acionamento de resolução mais baixa, como passo completo ou meiopasso, este *driver* aplica um recurso chamado emulação de micro-passo, objetivando suavização do movimento do motor. Entretanto, para baixas rotações a emulação não é eficiente (curva azul). A ativação do modo *Smooth* corresponde a habilitação de um filtro, capaz de melhorar a qualidade de energização progressiva em baixas rotações (curva verde). A energização progressiva filtrada pode reduzir a vibração típica do motor de passo à níveis imperceptíveis ao tato humano, mesmo em baixas rotações.

Figura 3.31 – Métodos para acionamento de motores de passo: a) passo completo; b) meiopasso; c) micro-passo; d) efeito do recurso Smooth sobre energização das bobinas



Fonte: a,b,c) How a Stepper Motor Works [41]; d) Guia de configuração do driver STR4/8 [42].

4 DISPOSITIVOS E RECURSOS DE ACIONAMENTO E CONTROLE

Em virtude das carências e dificuldades no âmbito da alimentação de consumíveis em soldagem PTA-P, evidenciadas no capítulo anterior, um grupo de dispositivos foi selecionado como objeto de análise desta tese de doutorado. O conjunto constitui-se de um sensor de fluxo de pó, dois tipos de ADP's, e uma válvula de controle dinâmico de fluxo de pó. Tanto este último dispositivo quanto o sensor de fluxo de pó consistem em desenvolvimentos exclusivos deste trabalho. Por meio destes, a presente tese visa contribuir com novos recursos em termos de dinâmica e instrumentação para sistemas de alimentação de pó. Quanto aos ADP's, embora já desenvolvidos em trabalhos anteriores, demandam análises comparativas entre si. Neste sentido este trabalho almeja disponibilizar informações, ainda não abordadas em literatura, quanto às suas qualidades e limitações, propondo a aplicação adequada de cada um deles no processo PTA-P.

4.1 SENSOR DE FLUXO DE PÓ

Elaborado durante o desenvolvimento deste trabalho, o Sensor de Fluxo de Pó está ilustrado na Figura 4.1. Baseado no princípio dos medidores centrífugos, é constituído, basicamente, por um motor responsável pela rotação do Centrifugador. Estes componentes são envolvidos por uma cápsula, formada por uma tampa e um funil. Na Tampa é conectada a linha de transporte pneumático proveniente do ADP, sendo que sua geometria induz a liberação do jato de pó direto no interior do Centrifugador. Quanto ao funil, é responsável pelo redirecionamento das partículas em direção à linha de transporte pneumático, conectada à sua extremidade inferior.



Fonte: Elaboração própria.

O Centrifugador é ilustrado pela Figura 4.2. A imagem em perspectiva do item (a) revela seu formato circular, com orifícios concêntricos e uma série de paredes radiais. Uma vista superior em corte, Figura 4.2 (b), evidencia estes elementos, mostrando o Canal de Injeção (orifício concêntrico maior), o Encaixe do Eixo do Motor (orifício concêntrico menor) e as Pás (paredes radiais). O item (c) da Figura 4.2 revela a peça com um fundo suavemente inclinado (para reduzir estagnação de partículas) e um teto (para manter as partículas em seu interior, além de fornecer estabilidade estrutural às Pás).



Figura 4.2 – Centrifugador: a) Vista em perspectiva isométrica; b) Vista superior em corte; c) Vista frontal.

Fonte: Elaboração própria.

A respeito de seu funcionamento, o Sensor de Fluxo de Pó é capaz de admitir os fragmentos do jato de pó por meio do Canal de Injeção. As partículas, que tendem a atravessar o Centrifugador, radialmente em todas as direções, são atingidas pelas Pás em rotação, transferindo carga ao eixo do motor. O carregamento do eixo, por seu turno, reflete proporcionalmente em flutuações das variáveis elétricas que dão movimento ao motor. Neste trabalho, o motor é acionado por uma fonte de corrente constante, de modo que a tensão corresponde ao sinal de medição.

O motor adotado para acionar o Centrifugador é um Motor CC de Fluxo Magnético Constante. Trata-se do modelo RF-300CA-11400, fabricado pela Indústria Mabuchi Motor [43]. A Figura 4.3 (a) apresenta o aspecto físico deste motor, enquanto a Figura 4.3 (b) ilustra seu acoplamento ao sensor. Como o Motor é encaixado sob pressão no Suporte disponível no Funil, seus orifícios de fixação perderam a função. Assim, para não haver infiltração de partículas e consequente travamento do motor, a Vedação de Silicone obstrui os orifícios e conserva o Motor em condições operacionais, aumentando a vida útil deste no ambiente hostil do interior da Cápsula. As principais características do Motor RF-300CA-11400 estão relacionadas na Tabela 4.1.



Figura 4.3 – Motor RF-300CA-11400: a) Aspecto físico do motor; b) Motor acoplado ao Suporte disponível no Funil da Cápsula do sensor

Fonte: a) Manual Motor CC RF-300CA-11400 [43]; b) elaboração própria.

Característica	Valor	Unidade
Diâmetro Corpo	24,4	mm
Altura Corpo	12,8	mm
Peso	22	g
Diâmetro do Eixo	2,0	mm
Faixa Tensão	1,2 - 6,0	V
Corrente Vazio	0,018	A
Velocidade Vazio	3700	rpm
Corrente Efic. Máx.	0,073	A
Veloc. Efic. Máx.	2970	rpm
Torque Efic. Máx.	0,38	mN.m

Tabela 4 1 .	– Princinais	características	do Motor	RE-300CA.	11400
		caracteristicas		KE-300CA	·11400

Fonte: Adaptado de Manual Motor CC RF-300CA-11400 [43].

4.2 ALIMENTADORES DE PÓ

Neste trabalho foram estudados dois tipos de ADP's, sendo estes o ADP de Tambor e o ADP de Esteira. As subseções a seguir abordam ambos alimentadores, priorizando aspectos pertinentes ao desenvolvimento deste trabalho.

4.2.1 ADP de Tambor

O ADP de Tambor Dosador é o equipamento apresentado na Figura 4.4 [44]. O item (a) desta figura ilustra seu real aspecto físico. Acompanhando o esquema exposto no item (b) da mesma figura, consiste em um Tambor (1) que revoluciona sob o Canal de Descarga (2) da tremonha cônica (3) que compõe a base do Reservatório.

Figura 4.4 – ADP de Tambor Dosador: a) Aspecto físico do equipamento; b) Vista em corte da estrutura mecânica com principais componentes: 1 – Tambor, 2 – Canal de Descarga, 3 – Funil do Reservatório, 4 – Regulador Manual de Dosagem, 11 – Conector Pneumático



Fonte: Plasma Master [44].

10

11

Durante seu funcionamento, o pó se deposita sobre o Tambor, formando uma pilha cônica no espaço (δ na figura) entre o Tambor e o Canal de Descarga. Em regime de rotação, o Tambor desloca continuamente o material, induzindo-o a cair sobre um funil, onde o Conector (11 na figura) o direciona para a linha de transporte pneumático. De acordo com seu princípio mecânico, o fluxo de consumível é regulado por intermédio da rotação do Tambor. Assim, quanto maior a rotação, maior a taxa de alimentação. Tipicamente, a relação entre taxa de alimentação e rotação se comporta de forma linear.

Embora seja equipado com um motor de passo para acionamento do Tambor, este modelo também fornece outro recurso para ajuste da taxa de alimentação de pó. Tal recurso corresponde ao Regulador Manual de Dosagem, identificado como elemento número (4) na Figura 4.4. Contudo, a Figura 4.5 mostra detalhes a respeito deste recurso adicional. De acordo com a Figura 4.5 (a), é mostrado que este artifício se baseia em um mecanismo de escala e nônio. A movimentação do nônio é responsável pela modificação do Gap, simbolizado como δ na Figura 4.5 (b). O aumento do Gap, por sua vez, expande a Pilha de Pó formada no espaço entre o Canal de Descarga e o Tambor, como pode ser visto na Figura 4.5 (c).

Figura 4.5 – Regulagem do Gap (δ) no ADP de Tambor Dosador: a) Regulador do Gap baseado em mecanismo de escala e nônio; b) Gap de 1,5 mm; c) Gap de 3,0 mm e principais elementos envolvidos





Fonte: Elaboração própria.

(c)

Como consequência, a variação do *Gap* determina o volume fixo de dosagem por volta do Tambor. Contudo, a variação da taxa de alimentação somente em função do *Gap*, apresenta comportamento com tendência exponencial [9]. Isto ocorre porque a pilha de pó tende a mudar, não só a altura, mas também seu ângulo de empilhamento. Uma última comparação entre as figuras 4.5 (b) e (c) permite observar que, quando menor, a pilha de pó é aproximadamente cilíndrica, e, quando maior, assume formato cônico.

4.2.2 ADP de Esteira

O ADP de Esteira é um dispositivo semelhante ao ADP de Tambor. Como mostra a Figura 4.6, é composto, essencialmente, de um mecanismo manipulador que opera em conjunto com um reservatório.



Figura 4.6 – ADP de Esteira: a) Aspecto físico do dispositivo; b) Vista em perspectiva do projeto em Ambiente CAD.

Fonte: Alves [11].

Contudo, neste alimentador, o Reservatório consiste em uma tremonha em formato de cunha, possuindo dois lados totalmente verticais e outros dois inclinados. Já o Mecanismo Manipulador corresponde a uma esteira transportadora. A alimentação se dá à medida em que o pó se deposita sobre a superfície plana da Esteira, ao escoar pelo Canal de Descarga retangular. Com a rotação da Esteira, as partículas de pó se precipitam continuamente sobre um funil ao qual está conectada a linha de transporte pneumático.

O protótipo estudado nesta tese é o mesmo ADP de Esteira desenvolvido em um trabalho anterior [11], contudo, apresenta duas alterações no mecanismo Manipulador de pó. Uma delas consiste na substituição das Polias de Apoio por um Suporte. A outra alteração corresponde à substituição de uma Esteira Artesanal por uma esteira confeccionada em impressão 3D (Esteira Impressa). A Figura 4.7 apresenta o mecanismo dosador com as duas configurações.

Figura 4.7 – Alterações no mecanismo do ADP de Esteira: a) Configuração original com Polias de Apoio e Esteira Artesanal; b) Configuração atual com Suporte e Esteira Impressa



Fonte: Elaboração própria.

Os referidos componentes de apoio da Esteira são mostrados lado a lado na Figura 4.8 para proporcionar as devidas comparações. As Polias de Apoio, responsáveis por manter a estabilidade da dosagem em função da variação da massa de pó no reservatório, apresentaram problemas de engrenamento. Uma delas é mostrada na Figura 4.8 (a). Ocorria que, após alguns ciclos, um dos dentes de engrenamento destas polias tendia a se sobrepor ao dente da correia. Tal fato provocava a variação do volume de dosagem e gerava perturbações na continuidade do jato de pó. Para evitar este fenômeno indesejado, um Suporte Plano, foi instalado no lugar das Polias de Apoio. O referido componente é ilustrado pela Figura 4.8 (b). Este não depende de engrenamento para executar sua função (de manter a estabilidade da dosagem em função da variação da massa de pó no reservatório). O Suporte oferece uma superfície plana e permite o deslizamento dos dentes da correia sincronizadora, oferecendo apoio e evitando a flexão desta pelo peso do pó. As extremidades arredondadas da superfície plana inibem impactos com os dentes da correia e, com isso, evitam trepidações do principal elemento de dosagem.



Fonte: Elaboração própria.

Imagens das esteiras mencionadas estão expostas na Figura 4.9, proporcionando as devidas comparações.

A esteira original do protótipo foi fabricada de maneira artesanal. Ilustrada na Figura 4.9 (a), consistia em uma correia sincronizadora (possui dentes de na face interna) com bordas obtidas pela aplicação manual de cordões de silicone em gel. Após secos, formavam ressaltos laterais ao longo de todo perímetro da correia (em ambos lados). O propósito destes ressaltos funda-se em estabelecer contenções, bloqueando a queda de pó pelos lados da Esteira, evitando, assim, despejo de partículas em locais indesejados no mecanismo e dificuldades no controle da vazão de consumível. Contudo, a aplicação manual do silicone produziu bordas irregulares, além de deixar resíduos de difícil remoção na superfície lisa da correia. Tais fatores mostraram-se prejudiciais à continuidade do jato de partículas, uma vez que a dosagem depende da regularidade geométrica da esteira.

Pelos motivos supracitados, a Esteira Artesanal foi trocada pela Esteira Impressa, mostrada na Figura 4.9 (b). Tal nomenclatura se deve ao fato desta ser obtida por processo de impressão tridimensional, em material polimérico flexível, a partir de um modelo 3D obtido via CAD. O projeto do modelo 3D conservou a geometria de engrenamento da face interna da correia sincronizadora, além de adicionar ressaltos de perfil suave às bodas, conferindo forma de uma calha à superfície externa da Esteira Impressa. Flexibilidade e regularidade geométrica são fatores fundamentais ao componente, uma vez que, engrenamento adequados e formato apropriado para estabilidade de dosagem, são imprescindíveis ao funcionamento adequado deste modelo de alimentador.



Figura 4.9 – Comparação de detalhes entre esteiras: a) Esteira Artesanal; b) Esteira Impressa.

Fonte: Elaboração própria.

O motor de passo selecionado para acionar o ADP de Esteira trata-se do modelo NEMA 23 KTC-HT23-397 [45]. A Figura 4.10 apresenta um modelo real deste motor em perspectiva no item (a), além de curvas de torque-velocidade no item (b). Já a Tabela 4.2, por sua vez, relaciona as principais características do referido modelo.



Figura 4.10 - Motor de Passo NEMA 23 KTC-HT23-397: a) Imagem do motor; c) Curva de

Fonte: Manual motor de passo NEMA 23 KTC-HT23-397 [45].

Característica	Valor	Unidade
Altura Flange	56,0	mm
Largura Flange	56,0	mm
Comprimento	50,8	mm
Peso	690	g
Diâmetro do Eixo	6,35 (1/4)	mm (pol.)
Ângulo do Passo	1,8	0
Corrente Bipolar Paralelo	2,8	A/Fase
Inércia	300	g.cm²
Torque Estático Bipolar	1,25	N.m
Temperatura de Operação	-20 a +50	°C
Quantidade de Fios	8	-

Tabala	12	Drincipaio	coractorícticos	do	Motor	22		2 207
i abela	4.Z –	FIIICIPAIS	caracteristicas	uυ	INICIOI	20	NIC-IIIZ	3-391

Fonte: Manual motor de passo NEMA 23 KTC-HT23-397 [45].

4.3 VÁLVULA DE CONTROLE DINÂMICO DE FLUXO DE PÓ

Consta, no escopo deste trabalho, o desenvolvimento de uma Válvula de Controle Dinâmico de Fluxo de Pó. A Figura 4.11 apresenta, esquematicamente, duas abordagens sobre o dispositivo elaborado. Seu mecanismo foi concebido para desviar o fluxo de partículas, total ou parcialmente, de forma cíclica ou permanente.



Figura 4.11 – Válvula de Controle Dinâmico de Fluxo de Pó: a) configuração para uso com 1 ADP; b) configuração para uso com 2 ADP's

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 4.11 (a) ilustra o uso como dispositivo de desvio de fluxo. A Válvula de Controle Dinâmico de Fluxo de Pó possui corpo dotado de galerias internas em forma de Y. Nesta configuração, às galerias, são conectados o ADP, a tocha de soldagem e um recipiente secundário por meio de mangueiras. Contudo, existe também uma galeria na qual opera o Obturador da válvula. Acionado por um motor de passo, o Obturador opera pressionando a Sede (O'Ring para vedação de gás), de modo a obstruir parcialmente ou totalmente as vias da tocha ou do recipiente

secundário. Embora o motor de passo permita controle de posicionamento do Obturador, foi adicionado fixo a este, um batente mecânico capaz de acionar sensores fim-de-curso. Tal recurso serve como referência de controle e proteção contra colisões do mecanismo. A finalidade deste controle de fluxo objetiva, primordialmente, dinamizar a alimentação, mantendo a proporcionalidade entre material de adição e potência de soldagem durante aplicações do PTA-P com corrente pulsada.

Entretanto, também pode facilitar estratégias processuais como uso de 2 ADP's na bancada, de acordo com a configuração proposta na Figura 4.11 (b). Neste caso, a válvula pode receber fluxo de pó proveniente de dois alimentadores com consumíveis diferentes, formando uma mistura com proporções condizentes ao posicionamento do Obturador. Sobre ainda outra possibilidade, a válvula pode favorecer uso alternado de dois ADP's, facilitando confecção de revestimentos compostos por mais de um tipo de material. Sob tal perspectiva, basta acionar o Obturador em posições extremas, comutando as vias.

O motor de passo, selecionado para acionar a Válvula de Controle Dinâmico de Fluxo de Pó, corresponde ao modelo M42SP-13NK [46]. A Figura 4.12 apresenta um modelo real deste motor em perspectiva no item (a), além de curvas de torquevelocidade no item (b). A Tabela 4.3 relaciona as principais características do modelo.



Figura 4.12 – Aspectos Gerais do Motor da Válvula de Controle Dinâmico de Fluxo de Pó: a) motor de passo modelo M42SP-13NK; c) curva de relação torque x velocidade do motor.

Fonte: Manual Motor de Passo M42SP-13NK [46].

Característica	Valor	Unidade
Odracteristica	Valor	Onidade
Diâmetro (Flange)	42,0	mm
Furação (Flange)	49,5	mm
Comprimento	18,0	mm
Peso	120	g
Diâmetro do Eixo	3,0	mm
Ângulo de Passo	7,5	grau
Corrente Bipolar Paralelo	0,6	A/Fase
Inércia	300	g.cm²
Torque Estático Bipolar	56,9	mN.m
Quantidade de Fios	4	-

Tabela 4.3 – Principais características do Motor M42SP-13NK

Fonte: Adaptado de Manual Motor de Passo M42SP-13NK [46].

4.4 RECURSOS DE ACIONAMENTO E CONTROLE

Todos os dispositivos estudados nesta tese são acionados por motores elétricos. Assim, para realizar o acionamento e controle destes protótipos foi montado o Sistema de Controle. Entretanto, tal complexo eletrônico também ostenta função de captar os sinais de medição do sensor desenvolvido neste trabalho.

A Figura 4.13 apresenta um diagrama de potência do Sistema de Controle, relacionando esquematicamente os elementos que o compõe em termos de alimentação de energia elétrica. O Sistema de Controle conta com uma fonte de tensão de 24V. Esta alimenta *drivers* de acionamento dos motores de passo do ADP e da Válvula de Controle Dinâmico. A tensão fornecida por tal fonte é reduzida, por um regulador, para 5 V, com finalidade de alimentar uma placa Arduino, responsável pelo controle dos motores de passo. Outra Placa Arduino, responsável unicamente pela aquisição e transmissão de dados de medição do Sensor de Fluxo de Pó, é alimentada via Computador. Este, por sua vez, é usado para interfacear a programação do Sistema de Controle via IDE (do inglês *Integrated Development*

Environment) do Arduino. Por fim, a Fonte de Corrente é responsável por acionar o motor do Sensor de Fluxo de Pó.



Figura 4.13 – Diagrama de potência do sistema de controle dos protótipos estudados

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 4.14, no que lhe concerne, apresenta o diagrama de sinais do Sistema de Controle, relacionando, esquematicamente, os elementos que o compõe em função da interação entre seus sinais eletrônicos.



Figura 4.14 – Aspectos Gerais do Motor da Válvula de Controle Dinâmico de Fluxo de Pó: a) motor de passo modelo M42SP-13NK; c) curva de relação torque x velocidade do motor.

Fonte: Elaboração própria.

A figura mostra que o Arduino de controle dos motores recebe o sinal proveniente do botão *Start/Stop*, para inicialização e finalização das tarefas do Sistema de Controle. É representada também a via de comunicação USB, por meio da qual a placa é programada. Sinais de saída digital *Step* e *Dir* para os *drivers* dos motores de passo do ADP e da Válvula de Controle Dinâmico de Fluxo de Pó também estão simbolizados na figura. Outro sinal de saída digital é enviado para uma entrada analógica do outro Arduino (de aquisição e transmissão de dados do sensor). Chamado na figura de Sinal Sincro, permite relacionar os dados registrados com os momentos de acionamento e parada dos motores de passo. Tal estratégia facilita interpretação e posterior tratamento estatístico do sinal de medição, por seu turno, fornecido pelo do Sensor de Fluxo de Pó. Contudo, o referido sinal somente fornece valor coerente, unindo ambos pinos de aterramento, característica também representada na Figura 4.14. Outra entrada analógica, também usada no Arduino de aquisição do sensor, recebe o nível de tensão do borne positivo da Fonte de Corrente, cujo sinal varia de acordo com a carga imposta pelo fluxo de pó ao Centrifugador.

Finalmente, a figura também esquematiza a conexão USB entre o Arduino do Sensor e o Computador. Neste caso, além de servir para alimentação e programação da referida placa, viabiliza a transmissão de dados de tensão do sensor ao Computador.

Com exceção da Fonte de Corrente e do Computador, todos os outros elementos que constituem o Sistema de Controle foram reunidos em uma plataforma chamada, neste trabalho, de Central de Controle e Acionamento. Os três módulos básicos citados serão devidamente comentados nas próximas sessões.

4.4.1 Computador

O computador integrado foi um *notebook* da marca ASUS, série X555L. Em termos de configuração de *hardware* e *software* conta, basicamente, com processador Intel Core i5-5200U com frequência de operação de 2,20 GHz, além de sistema operacional Windows 10 Home® de 64 bits. Nesta máquina foi instalada a IDE do Arduino, ambiente que permite a escrita, compilação e gravação do código de programação nos microprocessadores do Sistema de Controle. Tal interface também fornece o recurso *Monitor Serial*, capaz de mostrar, em tempo real, os valores das portas analógicas utilizadas pelos sinais Sincro e tensão do sensor.

90 B B B	COM8 (Arduino/Genuino Uno)				- 🗆 X
COMOUS int porta_a5 = A5; int leitura_porta_analogica5; int porta_a4 = A4; int leitura_porta_analogica4;	918 , 13 910 , 16 910 , 14 917 , 14 917 , 14	010	1.6		Enviar
<pre>void setup() { pinMode (A5, INPUT); pinMode (A5, INPUT); pinMode (A5, INPUT); poinMode (A5, INPUT); serial.begin (9600); } roid loop() { leitura_porta_analogica5 = analogRead (A5); leitura_porta_analogica4 = analogRead (A4); Serial.print(leitura_porta_analogica5); Serial.print(leitura_porta_analogica4); //Serial.print(" "); //Serial.prin(" "); //Serial.print(" "); //Serial.print(" ");</pre>	910, 14 910, 14 910, 14 916, 13 920, 14 915, 14 915, 14 922, 14 922, 14 922, 14 912, 13 910, 14 924, 13 921, 13 921, 13 921, 14 921, 13 921, 14 921, 14 92, 14 94,	910 ↑ Tensão Motor Sensor	, ⊥6 ∱ Sinal Sincro		
delay(1);	Auto-rolagem Show timestamp		Nova-linha	 ✓ 9600 velocidade 	✓ Deleta a saida
	_	_			_

Figura 4.15 – Tela da IDE do Arduino com recurso Monitor Serial

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 4.15 apresenta a tela da IDE do Arduino com a janela *Monitor Serial* aberta. É possível observar no *Monitor Serial* os valores das portas analógicas correspondentes ao valor de tensão do motor do Sensor de Fluxo de Pó e ao sinal de sincronização de dados.

4.4.2 Fonte de Corrente

A fonte utilizada consiste em uma fonte de alimentação modelo FA-3005, do fabricante Instrutherm [47]. A Figura 4.16 mostra a imagem de um exemplar em perspectiva.

A fonte FA-3005 corresponde a um modelo desenvolvido especialmente para pesquisa científica. Tensão ou corrente podem ser mantidas com alta estabilidade e reguladas continuamente dentro de faixas nominais de 32 V ou 3 A, respectivamente.

No equipamento foi regulada uma corrente de modo que, sem aplicação de fluxo de partículas ao Centrifugador (em vazio), a tensão consequente resultasse em aproximadamente 4,5 V. Prevendo a queda de tensão em função do acréscimo de carga, a tensão em vazio representa o maior valor introduzido na porta analógica do microcontrolador. Tal medida preza pela segurança do *hardware*, uma vez que a porta analógica opera com tensão máxima de 5 V (correspondente a 1023).



Figura 4.16 - Fonte de alimentação do Sensor de Fluxo de Pó

Fonte: Fonte de alimentação FA-3005 [47].

4.4.3 Central de Controle e Acionamento

A Figura 4.17 apresenta uma imagem em perspectiva da Central de Controle e Acionamento. Consiste em uma plataforma que agrupa os principais elementos responsáveis, por sua vez, por governar o funcionamento dos protótipos. Essencialmente, comporta dois *drivers* para motores de passo, um deles dedicado ao acionamento de um ADP e outro, no que lhe concerne, destinado ao acionamento da Válvula de Controle Dinâmico de Fluxo de Pó. Associados a estes, a central disponibiliza, também, os respectivos conectores para os motores de passo. Ademais, a plataforma ainda acomoda duas placas microprocessadas Arduino Uno® (uma dedicada exclusivamente ao Sensor de Fluxo de Pó e, outra, aplicada ao controle dos motores de passo), além de uma fonte de alimentação de energia elétrica.



Figura 4.17 – Central de Controle e Acionamento e principais componentes.

Fonte: Elaboração própria.

Quanto aos dois *drivers* de motores de passo, correspondem a produtos do fabricante Applied Motion Products. O ADP é acionado por um *driver* modelo STR8, mostrado na Figura 4.18 (a). Segundo consta em seu *datasheet* [42], o *driver* STR8 é apropriado para acionar o modelo de motor de passo NEMA 23 KTC-HT23-397, usado

por ambos ADP's estudados neste trabalho. Já a Válvula de Controle Dinâmico de Fluxo de Pó é acionada por *driver* modelo STR2, mostrado na Figura 4.18 (b) [48].

Este dispositivo foi selecionado por apresentar maior compatibilidade de ajuste de corrente, mostrando-se mais adequado ao acionamento do motor M42SP-13NK.

Os detalhes, associados aos respectivos *drivers* na Figura 4.18, mostram painéis de chaves seletoras disponíveis em cada modelo. As configurações mostradas determinam magnitude de corrente aplicada ao motor, percentual de economia de energia, seleção de propriedades dinâmicas, resolução de passo e opção de modo de acionamento suave. Este último recurso, denominado *Smooth*, se trata de um artifício especial destes modelos de *drivers*, não disponível em tecnologias mais básicas. Corresponde a uma forma gradual (rampa) e filtrada de injeção de corrente nas bobinas do motor. Quando habilitado, reduz vibrações (comuns neste tipo de motor em baixas rotações) a níveis imperceptíveis ao tato humano.



Fonte: a) Adaptado de Guia de Configuração do *driver* STR4/8 [42]; a) Adaptado de Guia de Configuração do *driver* STR2 [48].

A Central de Controle e Acionamento é dotada de duas placas microprocessadas Arduino Uno®. Consiste em um produto pertencente à plataforma

Arduino, adequado à prototipagem eletrônica com *hardware* livre para programação [49]. A Figura 4.19 apresenta uma vista superior da placa Arduino Uno®, sendo que as funcionalidades, comentadas a seguir, podem ser identificadas na própria placa.



Figura 4.19 – Placa Arduino Uno

Fonte: Datasheet Arduino Uno [49].

O Arduino Uno é munido de um microprocessador ATMEGA328P, programável via comunicação USB. Disponibiliza 14 portas digitais que podem ser configuradas tanto como entradas quanto saídas. Apresenta também 6 entradas analógicas, além de pinos de tensão de referência (GND), 5 volts, 3,3 volts e um que fornece a tensão de alimentação. Na Central de Controle e Acionamento, um Arduíno Uno é usado para realizar o controle dos motores de passo do ADP e da Válvula de Controle Dinâmico de Fluxo de Pó. O outro, por sua vez, é empregado exclusivamente para aquisição e transmissão de dados, provenientes do Sensor de Fluxo de Pó.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os recursos tecnológicos e os procedimentos adotados no desenvolvimento desta tese de doutorado. Tais metodologias foram aplicadas nos estudos analíticos sobre os protótipos abordados no capítulo anterior. Neste sentido, como desfecho de análises operacionais impostas aos referidos componentes mecatrônicos, estes foram submetidos a aplicações práticas de soldagem PTA-P. A Figura 5.1 apresenta a bancada de soldagem PTA-P disponível no LABSOLDA. Tal plataforma conta, essencialmente, com um ADP, uma mesa de soldagem, uma fonte de soldagem, uma Tocha PTA-P, um robô manipulador da tocha e uma unidade de refrigeração.

O alimentador de pó adotado, atualmente, para aplicações gerais nas pesquisas empreendias sobre o processo PTA-P no LABSOLDA é o ADP de Tambor. Trata-se um modelo de alimentador fabricado pela empresa nacional que atua no ramo de sistemas e processos de soldagem – SPS. É capaz de fornecer taxas de alimentação de até 10 kg/h, além de estocar 600 cm³ de pó em seu reservatório. Opera com partículas esféricas cuja distribuição granulométrica variando entre 45 e 250 µm [50]. É instalado à uma altura de aproximadamente 1 m acima do nível da mesa de soldagem.

A mesa de soldagem, por seu turno, embora exerça função principal de sustentação e posicionamento de peças a serem soldadas também mantém fixos, principalmente, o suporte do ADP e o trilho do robô manipulador da tocha PTA-P.

Acerca do robô que integra a bancada, trata-se do Tartílope V2®. Consiste em um manipulador robótico com dois graus de liberdade, fabricado pela empresa de sistemas e processos de soldagem – SPS. Possibilita movimentos pré-programados em planos paralelos a seu trilho. A principal função desta operacionalidade é a execução de trajetórias de soldagem com tecimento, muito utilizadas, por sua vez, em soldagem de revestimento. É formado, basicamente, por um módulo eletrônico microprocessado (CPU), um módulo trator (robô, suporte da tocha e trilho) e um controle remoto de programação (IHM) [51]. Quanto à tocha PTA-P que integra a bancada, consiste no modelo PTS-3®, também do fabricante SPS. Está equipada com um bico que apresenta orifício constritor de 3,2 mm e quatro orifícios injetores de pó. O limite de corrente informado pelo fabricante é de 200 A em operação contínua [52]. Esta tocha apresenta apenas um circuito de refrigeração.

No tocante à unidade de refrigeração que compõe a bancada PTA-P, trata-se do modelo MA-083® do fabricante Marconi. Consiste em um equipamento formado, primordialmente, por um sistema de bomba e radiador. É usado para manter a temperatura da Tocha PTA-P em níveis seguros, por meio de convecção forçada. Comportando um volume de 20 litros, o *chiller* também conta com um compressor hermético de refrigeração, o qual permite manter a temperatura do fluido da cuba em torno de um valor pré-programado (ajustável até -10°C) [53].

Por fim, no que tange à fonte de soldagem disponível na bancada, consiste no modelo Digiplus A7®. Fabricada pela empresa IMC Soldagem, trata-se de um equipamento multiprocesso com capacidade de fornecer corrente contínua máxima de 450 A, possibilitando configurações de corrente constante ou pulsada. É equipada com uma placa de controle baseada na tecnologia dos microcontroladores ARM 7 (fonte microcontrolada) [54]. Dispõe também de uma interface munida de um display de LCD associado, por sua vez, a botões que permitem navegar em seu software, selecionando funções e mostrando valores de saída e/ou de entrada. A fonte Digiplus A7 integra periféricos essenciais ao processo PTA-P, incluindo um ignitor de alta frequência associado a uma fonte de corrente de baixa potência para abertura e manutenção do arco piloto. Embora disponha apenas de uma válvula abre/fecha para o gás de proteção (exigindo um fluxímetro externo), a fonte permite regulagem e controle das vazões dos gases plasma e de arraste via servo-válvulas. Outro recurso que a fonte disponibiliza consiste, ainda, no controle da taxa de alimentação de pó. Tal função é viabilizada pela integração de um *driver* de motor de passo STR8 para acionamento do ADP. Assim sendo, devido às possibilidades de controle e comunicação concedidas pelos periféricos descritos, a fonte oferece a regulagem, não só de parâmetros constantes de vazões de gás e pó, mas, também, de rampas.

A partir da bancada de soldagem apresentada, foram obtidas configurações específicas para avaliação, não só dos dispositivos desenvolvidos neste trabalho (como o Sensor de Fluxo de Pó e a Válvula de Controle Dinâmico de Fluxo de Pó)

mas, também, dos dois ADP's. Entretanto, peculiaridades referentes às metodologias adotadas para cada componente, serão abordadas nas próximas seções.



Figura 5.1 – Bancada de soldagem PTA-P disponível no LABSOLDA - UFSC

Fonte: Elaboração própria.

5.1 ANÁLISE DO SENSOR DE FLUXO DE PÓ

As avaliações do Sensor de Fluxo de Pó consistem em medir variações de tensão elétrica do Motor enquanto o Centrifugador é exposto a jato de partículas. Tal fluxo é formado por materiais e condições típicas de aplicação no processo de soldagem PTA-P. Para tanto, foi necessário montar a bancada de testes apresentada na Figura 5.2. Esta é constituída pelo ADP de Tambor, a Válvula Controladora de Vazão de Gás de Arraste (modelo GFCS-010212 do fabricante Aalborg [55]), o Sensor de Fluxo de Pó, o Recipiente, a Fonte do Sensor, a Central de Controle e Acionamento e o Computador.

A operação da bancada inicia quando o ADP, comandado pela Central de Controle e Acionamento, dispensa o particulado em direção ao Sensor de Fluxo de Pó. A Válvula Controladora de Vazão de Gás de Arraste garante a constância do fluxo gasoso que auxilia a transferência das partículas de pó. Vale ressaltar que o modelo de alimentador utilizado nos testes foi o ADP de Tambor. O Sensor, por sua vez, foi alimentado com a Fonte de Energia em modo de corrente constante, de forma que a tensão do motor flutuava de acordo com a carga de partículas imposta ao seu Centrifugador. Esta flutuação de tensão, por seu turno, foi monitorada com auxílio da Central de Controle e Acionamento e do Computador. Ao passar pelo sensor, o pó era depositado no Recipiente para evitar seu desperdício.

As análises sobre o Sensor de Fluxo de Pó, abordadas nas seções a seguir, buscam caracterizar aspectos de dimensionamento, comportamentos metrológicos e operacionais. No que tange ao dimensionamento, os estudos buscaram determinar formas geométricas e dimensões adequadas aos principais aspectos do Centrifugador e da Cápsula. Acerca dos comportamentos metrológicos, as análises foram empreendidas para elucidar características estáticas e dinâmicas do sinal de medição do sensor. Por fim, quanto aos estudos referentes às propriedades operacionais, foram executados para caracterização de possíveis interferências originadas, por sua vez, de condições de instalação e por parâmetros do próprio processo PTA-P.



Figura 5.2 – Bancada de avaliação do Sensor de Fluxo de Pó

Fonte: Elaboração própria.

5.1.1 Influência de Parâmetros Geométricos do Centrifugador

Por conta da carência de informações pertinentes ao modelamento geométrico e dimensionamento de um centrifugador (adequado à medição da vazão de pó tal como ocorre na soldagem PTA-P), houve necessidade de realizar seis séries de ensaios. Cada uma arquitetada para investigar o efeito de um aspecto particular do Centrifugador (geométrico ou dimensional) sobre o sinal elétrico gerado pelo sensor. A Figura 5.3 apresenta os centrifugadores, alinhando-os de acordo com o aspecto e informando o valor do parâmetro no canto superior direito de cada modelo.

Conforme a Figura 5.3, os aspectos selecionados para estudo foram o diâmetro (α), o número de pás (β), a inclinação do teto (γ), o comprimento das pás (δ), o raio de curvatura das pás (ϵ) e a altura (ζ). Para cada um destes, três parâmetros foram escolhidos, exigindo a confecção de um centrifugador para cada nível averiguado. As quantificações das características que permanecem inalteradas em cada série de ensaios são apresentadas na Tabela 5.1.

O procedimento dos ensaios consistiu em monitorar a tensão do motor do Sensor de Fluxo de Pó antes, durante e depois do acionamento do ADP de Tambor. O alimentador era acionado repentinamente (sem rampas de aceleração), com o Tambor mantido em rotação constante por 30 segundos e, ao fim, era desligado também repentinamente. Para cada parâmetro geométrico foram executados 5 ensaios, de modo que as curvas plotadas nos gráficos resultantes são compostas pelas médias de cada instante. Os parâmetros de ensaio, referentes ao *setup* dos elementos da bancada, foram mantidos constantes de acordo com a Tabela 5.2.



Fonte: Elaboração própria.

geomotila de Continuagador							
		Parâmetros					
		α(mm) β γ(°) δ(mm) ε(mm) ζ(mm)					
	α(mm)	-	20	0	6,5;19;24	8	10
	β	60	-	0	24	∞	10
ies	γ(°)	60	15	-	24	8	10
séri	δ(mm)	60	15	10	-	8	10
	ε(mm)	60	15	0	24	-	10
	ζ(mm)	60	15	0	24	∞	-

Tabela 5.1 – Valores de características inalteradas em uma mesma série na avaliação da geometria do Centrifugador

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 5.2 – Parâmetros mantidos constantes na avaliação da geometria do Centrifugador

PARÂMETROS	VALORES	UNIDADES
Rotação do Tambor	15	rpm
Vazão Arraste	3,0	l/min
Corrente na Fonte do Sensor	0,07	A
Taxa Aquisição	100	Hz
Consumível PTAPowder1	-	-
Granulometria	(+50 – 150)	μm
Morfologia Esférica	-	-

Fonte: Elaboração própria.

5.1.2 Influência da Geometria da Cápsula

Além da geometria do Centrifugador, julgou-se necessário, também, avaliar algumas características referentes ao formato da Cápsula do Sensor de Fluxo de Pó. Para tanto foram fabricados dois sensores. Os modelos CAD de cada sensor estão ilustrados em corte na Figura 5.4, onde é possível comparar diferenças geométricas e dimensionais entre as cápsulas.



Figura 5.4 – Aspectos geométricos da Cápsula: a) Sensor de Tampa Inclinada; b) Sensor de

Fonte: Elaboração própria.

O único aspecto modificado propositalmente diz respeito ao ângulo das paredes laterais da Tampa. Como indicado na Figura 5.4 (a), o Sensor de Tampa Inclinada apresenta ângulo da parede em 45º com o plano de centrifugação, enquanto o Sensor de Tampa Perpendicular, Figura 5.4 (b), possui parede perpendicular a tal plano. Como também representado na Figura 5.4 (com setas brancas), a parede inclinada em 45º produz um ângulo de rebatimento das partículas centrifugadas, capaz de induzi-las diretamente ao funil do sensor. Já a parede perpendicular, por sua vez, tende a rebater as partículas novamente em direção ao Centrifugador. Enfim, tal avalição foi realizada para averiguar e comparar o sinal elétrico produzido nas condições descritas.

Por outro lado, as configurações de ângulo de inclinação da parede da Cápsula obrigaram variações de outras características, levando a mudanças consideráveis entre os dois sensores, como pode ser observado ainda na Figura 5.4.

O efeito principal manifestou-se como uma necessidade de, para um mesmo diâmetro do Centrifugador, aumentar o diâmetro do flange da Tampa. Por consequência, também houve necessidade de aumentar o diâmetro do flange do Funil. Priorizando a conservação dos demais parâmetros geométricos, a Cápsula com Tampa de parede inclinadas acabou por apresentar maior volume interno. Quanto ao Centrifugador selecionado para compor ambos sensores, apresenta diâmetro de 60 mm, altura de 15 mm, 20 pás retas de 14 mm de comprimento e teto aproximadamente reto.

O procedimento dos ensaios consistiu em monitorar a tensão imposta sobre o motor do Sensor de Fluxo de Pó antes, durante e depois do acionamento do ADP de Tambor. O alimentador era acionado repentinamente (sem rampas de aceleração), com o Tambor mantido em rotação constante por 30 segundos e, ao fim, era desligado também repentinamente. Para cada parâmetro geométrico foram executados 5 ensaios, de modo que as curvas a serem plotadas nos gráficos são compostas pelas médias de cada instante. Os parâmetros de ensaio, referentes ao *setup* dos elementos da bancada, foram mantidos constantes de acordo com a Tabela 5.3.

Tabela 5.5 – Parametros empregados em availações da geometria da Capsula					
PARÂMETROS	VALORES	UNIDADES			
Rotação do Tambor	15	rpm			
Vazão Arraste	3,0	l/min			
Corrente na Fonte do Sensor	0,07	A			
Taxa Aquisição	100	Hz			
Consumível PTAPowder1	-	-			
Granulometria	(+50 – 150)	μm			
Morfologia Esférica	-	-			

Tabela 5.3 – Parâmetros empregados em avaliações da geometria da Cápsula

Fonte: Elaboração própria.

5.1.3 Análises Metrológicas

Após estudos sobre influências de parâmetros geométricos do Centrifugador e da Cápsula, foi adotado um sensor munido de um Centrifugador com diâmetro de 60 mm, altura de 15 mm, 20 pás retas de 14 mm de comprimento e teto aproximadamente reto. A Cápsula escolhida foi a de Tampa Perpendicular (de menor volume interno). As análises metrológicas investidas sobre o Sensor de Fluxo de Pó, como instrumento de medição, foram empreendidas de modo a caracterizar suas propriedades em termos dinâmicos e estáticos. As próximas seções discorrem sobre ambos aspectos de estudo.

5.1.3.1 Análise de Desempenho Dinâmico do Sensor de Fluxo de Pó

Com relação ao desempenho dinâmico, os aspectos principais averiguados foram o comportamento geral do sinal, em ciclo completo de operação e reação da tensão durante alimentação intermitente. No caso do monitoramento durante ciclo completo de operação, foram analisados os perfis do sinal ao receber (subitamente) o jato de pó, durante o regime de alimentação e após a interrupção (repentina) do fluxo. As condições de ensaio, neste contexto, são as mesmas estabelecidas para análise da influência de parâmetros geométricos do Centrifugador e da Cápsula. Já durante acionamento intermitente do ADP, a rotação do Tambor, de 15 rpm, era liberada e interrompida sequencialmente, com períodos iguais. O perfil de acionamento descrito é ilustrado pela Figura 5.5.



Figura 5.5 – Perfil de acionamento do ADP de Tambor durante análises do comportamento dinâmico do sinal do sensor perante alimentação intermitente



As bases de tempo em *on* e *off* foram variadas de 1,5 à 4,5 s. A intenção destes ensaios foi mostrar qual o tempo mínimo que o sinal leva para estabilizar nos patamares absolutos, buscando, com isto, quantificar a velocidade de resposta do sensor em regime de operação. Os demais parâmetros destes ensaios estão relacionados na Tabela 5.4.

PARÂMETROS	VALORES	UNIDADES
Rotação do Tambor	15	rpm
Taxa de Alimentação	2,048	kg/h
Vazão de Gás de Arraste	3,0	l/min
Corrente na Fonte do Sensor	0,07	A
Taxa de Aquisição	100	Hz
Consumível PTAPowder1	-	-
Granulometria	(+50 – 150)	μm
Morfologia Esférica	-	-

Tabela 5.4 – Parâmetros empregados em análises do desempenho dinâmico do sinal do sensor perante alimentação intermitente

Fonte: Elaboração própria.

5.1.3.2 Análise de Desempenho Estático do Sensor de Fluxo de Pó

As investigações relativas ao comportamento estático do Sensor de Fluxo de Pó objetivaram, primeiramente, levantamento de curva de calibração, referente à massa dispensada pelo ADP em função da rotação do Tambor. Na sequência, foi levantada nova curva de calibração, neste caso, correspondente a relação entre tensão do sensor e rotação do Tambor. Por fim, usando como base dados obtidos nas atividades anteriormente mencionadas, a curva característica da taxa mássica em função da tensão do sensor pode ser traçada.

No que tange à calibração da taxa mássica em função da rotação do ADP de Tambor, consistiu em filmar o *display* de uma balança de precisão. Deste modo, a indicação dos valores de massa dispensada pelo Tambor podia ser associada ao tempo de vídeo, para cada nível de rotação ensaiado. A equação 5.1 permitiu o cálculo da taxa mássica (Txm), a partir dos valores mássicos inicial (m_i) e final (m_f) observados em um intervalo de tempo delimitado por um valor inicial (t_i) e um valor final (t_f). A
operação escrita foi realizada 6 vezes para cada patamar de revolução do Tambor, viabilizando obtenção de valores médios, e respectivos desvios-padrão, da massa de pó dispensada. Principais parâmetros e condições destes ensaios estão relacionados, por sua vez, na Tabela 5.5.

$$Txm = \frac{m_f - m_i}{t_f - t_i} \tag{5.1}$$

PARÂMETROS	ESPECIFICÁÇÕES	UNIDADES
Consumível PTAPowder1	-	-
Granulometria	(+50 – 150)	μm
Morfologia	Esférica	-
Vazão Arraste	3,0	l/min
Faixa de Rotação	0 a 20	rpm
Incremento de Rotação	1	rpm
Gap do ADP de Tambor	0,8	mm

Tabela 5.5 – Parâmetros usados durante calibração do ADP de Tambor

Fonte: Elaboração própria.

Já no que concerne à obtenção da curva de tensão do sensor em função da rotação do Tambor consistiram em, com auxílio da bancada já mostrada na Figura 5.2, registrar os valores de tensão fornecidos pelo sensor durante 1 minuto, para cada nível de rotação testado. Os dados de tensão registrados no *monitor serial* (no computador) foram armazenados em planilha virtual, agrupados de acordo com o nível de rotação correspondente. Por fim, para cada rotação, 6 ensaios foram executados, originando valores médios de tensão, com respectivos desvios-padrão. Os principais parâmetros e condições iniciais dos ensaios, estão relacionados na Tabela 5.6.

em função da rotação do ADP de Tambor			
Tabela 5.6 – Parâmetros empregados durante	e levantamento da cur	va de tensão do sensor	

PARÂMETROS	ESPECIFICAÇÕES	UNIDADES
Vazão Arraste	3,0	l/min
Corrente na Fonte do Sensor	0,07	A
Taxa Aquisição	100	Hz
Consumível PTAPowder1	-	-
Granulometria	(+50 – 150)	μm
Morfologia	Esférica	-
Faixa de Rotação	0 a 20	rpm
Incremento de Rotação	1	rpm
<i>Gap</i> do ADP de Tambor	0,8	mm

Fonte: Elaboração própria.

Por fim, a curva característica da taxa mássica em função da tensão do Sensor de Fluxo de Pó pode ser obtida, cruzando os valores médios de tensão com as médias dos valores mássicos, obtidos nos respectivos ensaios de calibração. Contudo, além da curva formada pelos valores médios, foram plotadas curvas auxiliares que delimitam a repetibilidade do sensor. Tal parâmetro (Re_s) foi calculado a partir da equação 5.2, que multiplica o desvio-padrão (u) pelo número 2,649, o qual equivale ao coeficiente t de Student correspondente ao grau de liberdade 5 [56]. Tanto os valores médios de tensão como os de taxa mássica possuem tal grau de liberdade por serem obtidos de uma série de 6 ensaios. Por conta disto, cada ponto da curva possui sua repetibilidade de modo que, como este número se estende para mais ou para menos (em relação ao valor médio), duas curvas são geradas em torno da curva característica.

$$Re_s = 2,649.u$$
 (5.2)

5.1.4 Influência da Vazão de Gás de Arraste

Embora a literatura recomende manter o Gás de Arraste em vazões não muito altas [4] (sendo 2,0 l/min um valor de referência), às vezes, ocorre necessidade de aumentá-la. Em favor da manutenção da rigidez dos jatos de pó e da taxa de alimentação requeridos, a fonte de soldagem permite regular até 5,0 l/min de vazão de Gás de Arraste. Em decorrência disto, julgou-se prudente investigar se a variação da vazão de tal gás pode interferir no sinal de tensão fornecido pelo sensor.

As atividades de avaliação do sensor, em função da vazão de Gás de Arraste, foram conduzidas na bancada já ilustrada na Figura 5.2. Consistiram em submeter o sensor a um fluxo de pó decorrente de uma rotação fixa, formado por vazões em níveis diferentes. Principais parâmetros e condições iniciais dos ensaios estão relacionados, por sua vez, na Tabela 5.7.

PARÂMETROS	ESPECIFICAÇÕES	UNIDADES
Rotação do Tambor	3	rpm
Taxa de Alimentação	0,492	kg/h
Corrente na Fonte do Sensor	0,07	A
Taxa de Aquisição	100	Hz
Faixa de Vazão de Gás	1 a 5	l/min
Incremento de Vazão de Gás	1	l/min
Consumível PTAPowder1	-	-
Granulometria	(+50 – 150)	μm
Morfologia Esférica	Esférica	-

Tabela 5.7 – Parâmetros de avaliação da influência da vazão de gás de arraste

Fonte: Elaboração própria.

Para cada nível de vazão, o procedimento consistiu em monitorar a tensão imposta sobre o motor do Sensor de Fluxo de Pó antes, durante e depois do acionamento do ADP de Tambor. Nos ensaios, o alimentador foi acionado repentinamente (sem rampas de aceleração), com o Tambor mantido em rotação constante por 30 segundos e, ao fim, era desligado também repentinamente. A operação descrita permitiu avaliar a influência da vazão de gás de arraste, não só em termos de estabilidade do sinal em regime, mas também seu comportamento dinâmico nos estágios transitórios de início e fim. Para cada nível de vazão, foram realizados 6 ensaios, de modo que as curvas plotadas no gráfico resultante são compostas por valores médios de tensão.

5.1.5 Influência da Inclinação do Sensor

Mesmo que o Sensor de Fluxo de Pó possua funil com angulação acentuada, característica apropriada para favorecer a retomada das partículas pela linha de transporte pneumático, faz sentido averiguar seu desempenho quando inclinado. Esta informação pode ser essencial, servindo como requisito de instalação do mesmo no sistema de alimentação de pó.

A influência da inclinação do sensor sobre seu sinal de resposta foi verificada por meio da execução de duas baterias de ensaios, na qual o sensor foi disposto nas posições mostradas na Figura 5.6.

Figura 5.6 – Influência da inclinação do sensor de fluxo de pó: a) Posição normalmente vertical; b) Posição inclinada



Fonte: Elaboração própria.

No item (a) desta figura é mostrado o sensor em sua condição comum de posicionamento. A posição inclinada é ilustrada no item (b) da Figura 5.6. Nesta figura

é possível observar que o sensor foi mantido em uma inclinação de aproximadamente 33º em relação ao eixo vertical, conferida com um goniômetro. Desta forma, como o ângulo do funil apresenta 60º, ainda foi mantida uma inclinação de 27º para o escoamento do pó em direção à linha de transporte pneumático.

As atividades de avaliação do desempenho do sensor em função da inclinação foram conduzidas na bancada já ilustrada na Figura 5.2. Para cada posição, o procedimento consistiu em monitorar a tensão imposta sobre o motor do Sensor de Fluxo de Pó antes, durante e depois do acionamento do ADP de Tambor. O alimentador era acionado repentinamente (sem rampas de aceleração), com o Tambor mantido em rotação constante por 30 segundos e, ao fim, era desligado também repentinamente. A operação descrita permitiu avaliar a influência da inclinação do sensor, não só em termos de estabilidade do sinal em regime, mas também seu comportamento dinâmico nos transitórios de início e fim. Para cada posição, foram realizados 6 ensaios, de modo que as curvas plotadas no gráfico resultante são compostas por valores médios de tensão. Principais parâmetros e condições iniciais dos ensaios estão relacionados, por sua vez, na Tabela 5.8.

PARÂMETROS	ESPECIFICAÇÕES	UNIDADES
Rotação do Tambor	3	rpm
Taxa de Alimentação	0,492	kg/h
Vazão Arraste	3,0	l/min
Corrente na Fonte do Sensor	0,07	A
Taxa Aquisição	100	Hz
Consumível PTAPowder1	-	-
Granulometria	(+50 – 150)	μm
Morfologia	Esférica	-

Tabela 5.8 – Parâmetros empregados em investigações sobre influências da inclinação do Sensor de Fluxo de Pó

5.1.6 Influência da Aceleração da Gravidade

Outro aspecto de instalação do Sensor do Fluxo de Pó no sistema de alimentação consiste na distância vertical entre este e o ADP. Em virtude de o sensor poder ser instalado em qualquer ponto ao longo da linha de transporte pneumático, é necessário saber se a altura pode interferir em sua tensão de resposta. Tal influência pode ocorrer, já que a aceleração da gravidade tende a influenciar na intensidade do impacto dos fragmentos com o Centrifugador. A influência da aceleração da gravidade foi averiguada utilizando-se três comprimentos de mangueira diferentes, as quais, dispostas verticalmente, mantiveram o sensor em alturas distintas. A Figura 5.7 demonstra a bancada, enfatizando as mangueiras e seus respectivos comprimentos.

Figura 5.7 – Influência da aceleração da gravidade: a) mangueira de 20 mm; b) mangueira de 200 mm; c) mangueira de 400 mm



Fonte: Elaboração própria.

As atividades de avaliação do desempenho do sensor em função da aceleração da gravidade foram conduzidas na bancada já ilustrada pela Figura 5.2. Para cada comprimento de mangueira, o procedimento consistiu em monitorar a tensão imposta sobre o motor do Sensor de Fluxo de Pó antes, durante e depois do acionamento do ADP de Tambor. O alimentador era acionado repentinamente (sem rampas de aceleração), com o Tambor mantido em rotação constante por 30 segundos e, ao fim, era desligado também repentinamente. A operação descrita permitiu avaliar a influência da aceleração da gravidade sobre o sensor, não só em

termos de estabilidade do sinal em regime, mas também seu comportamento dinâmico nos transitórios de início e fim. Para cada comprimento de mangueira foram realizados 6 ensaios, de modo que as curvas plotadas no gráfico resultante são compostas por valores médios de tensão. Principais parâmetros e condições iniciais dos ensaios estão relacionados, por sua vez, na Tabela 5.9.

PARÂMETROS	VALORES	UNIDADES	
Rotação do Tambor	3	rpm	
Taxa de Alimentação	0,492	kg/h	
Vazão Arraste	3,0	l/min	
Corrente na Fonte do Sensor	0,07	A	
Taxa Aquisição	100	Hz	
Consumível PTAPowder1	-	-	
Granulometria	(+50 – 150)	μm	
Morfologia Esférica	-	-	

Tabela 5.9 – Parâmetros empregados em investigações a respeito de influências da aceleração da gravidade

Fonte: Elaboração própria.

5.1.7 Influência de Movimento Oscilatório

Ainda outro fenômeno a ser averiguado consiste na influência de movimento oscilatório aplicado sobre o Sensor de Fluxo de Pó. Tal investigação foi realizada para identificar se o sinal de tensão pode ser perturbado pela movimentação do sensor durante operação. As informações retornadas por este ensaio respondem se o referido dispositivo deve ser instalado no sistema de alimentação de forma estática. Além disto, os testes elucidam sobre possibilidade de operação do sensor fixado à tocha de soldagem PTA-P, exposta, nesta situação, às movimentações oscilatórias frequentemente empregadas em atividades de revestimento.

Os ensaios de investigação sobre a influência de movimentos oscilatórios no desempenho do sensor foram realizados usando o procedimento ilustrado na Figura 5.8. O sensor foi fixado por pressão na extremidade do braço do Tartílope V2

disponível na bancada. O Tartílope foi acionado em modo de tecimento em frequências de diferentes níveis, realizando movimentação do braço como indicado na figura. Principais parâmetros e condições iniciais dos ensaios estão relacionados, por sua vez, na Tabela 5.10.

As atividades de avaliação do desempenho do sensor em função dos movimentos oscilatórios foram conduzidas na bancada já mostrada na Figura 5.2. Para cada frequência de oscilação, o procedimento consistiu em monitorar a tensão imposta sobre o motor do Sensor de Fluxo de Pó antes, durante e depois do acionamento do ADP de Tambor. O alimentador era acionado repentinamente (sem rampas de aceleração), com o Tambor mantido em rotação constante por 30 segundos e, ao fim, era desligado também repentinamente. A operação descrita permitiu avaliar a influência dos movimentos oscilatórios, não só em termos de estabilidade do sinal em regime, mas também sobre seu comportamento dinâmico nos períodos transitórios de início e fim. Para cada frequência, foram realizados 6 ensaios, de modo que as curvas plotadas no gráfico resultante são compostas por valores médios de tensão.



Figura 5.8 - Influência de movimento oscilatório sobre o Sensor de Fluxo de Pó

Fonte: Elaboração própria.

PARÂMETROS	ESPECIFICAÇÕES	UNIDADES
Tecimento	Retangular	-
Amplitude	3	mm
Tempos de Parada	0	S
Faixa de Frequência	0 a 4	Hz
Incremento de Frequência	1	Hz
Rotação do Tambor	3	rpm
Taxa de Alimentação	0,492	kg/h
Vazão de Gás de Arraste	3,0	l/min
Corrente na Fonte do Sensor	0,07	A
Taxa de Aquisição	100	Hz
Consumível PTAPowder1	-	-
Granulometria	(+50 – 150)	μm
Morfologia	Esférica	-

Tabela 5.10 – Parâmetros de avaliação sobre influências de movimentos oscilatórios sobre o sinal de medição do Sensor de Fluxo de Pó

Fonte: Elaboração própria.

5.1.8 Análise de Influência sobre Transporte Pneumático

Uma vez que o Sensor de Fluxo de Pó consiste em um dispositivo instalado na linha de transporte pneumático, é natural esperar alguma interferência deste sobre o fluxo de partículas. Assim, para qualificar o comportamento do jato de partículas após passagem pelo sensor, foram realizadas análises baseadas em filmografia. A Figura 5.9 exibe detalhes sobre os procedimentos analíticos envolvidos.

A filmografia consistiu em registrar em vídeo a saída de transporte pneumático, utilizando uma câmera, um suporte e uma placa escura. Como mostra a Figura 5.9 (a), o suporte foi fixado à mesa de soldagem, de modo a manter a câmera devidamente posicionada para filmagem do jato de pó, o qual era mantido em contraste enquanto anteposto a um fundo sombreado (formado pela placa escura). Os filmes gerados foram analisados com auxílio do *software* VLC Player®, o qual

permite execução dos arquivos de vídeo *frame* por *frame*. Os vídeos produzidos apresentaram taxa de 25 *frames* por segundo.

Figura 5.9 – Análises de Influência do Sensor de Fluxo de Pó sobre transporte pneumático: a) configuração de bancada para análise videográfica; b) linha pneumática com apenas o sensor de medição; c) linha pneumática com sensores de agitação e medição em série



Fonte: Elaboração própria.

(b)

medidor

(c)

As filmagens foram realizadas em duas experiências diferentes. A primeira consistiu em monitorar o sinal do sensor quando exposto a fluxo de partículas diretamente do ADP de Tambor, usando a configuração mostrada na Figura 5.9 (b). Na segunda, foram usados dois sensores em série: o de Cápsula com Tampa Inclinada (como agitador) e o de Cápsula com Tampa Perpendicular (como medidor). A Figura 5.9 (c) ilustra a configuração de instalação dos referidos dispositivos. Tal atividade foi empreendida com objetivo de descobrir se a agitação do fluxo de partículas por parte do Centrifugador é capaz de modificar o padrão de alimentação imposto pelo ADP de Tambor. No experimento, o Sensor de Cápsula com Tampa Inclinada foi instalado entre o ADP e o Sensor de Cápsula com Tampa Perpendicular, somente mantendo o Centrifugador acionado para produzir efeito sobre o fluxo de pó. O Sensor de Cápsula com Tampa Perpendicular foi usado para monitorar o fluxo de pó, do qual era lido o valor de tensão durante o ensaio.

A tabela 5.11 relaciona os principais parâmetros empregados nas análises de influência do Sensor de Fluxo de Pó sobre o transporte pneumático.

PARÂMETROS	ESPECIFICAÇÕES	UNIDADES
Consumível PTAPowder1	-	-
Granulometria	(+50 – 150)	μm
Morfologia	Esférica	-
Rotação do Tambor	8	rpm
Taxa de Alimentação	1,242	kg/h
Vazão Arraste	3,0	l/min
Tensão do Sensor Agitador	5,0	V
Corrente do Sensor Medidor	0,07	A
Taxa Aquisição Sensor Medidor	100	Hz

Tabela 5.11 – Principais parâmetros empregados nas análises de influências do Sensor de fluxo de Pó sobre transporte pneumático

5.1.9 Ensaios de Soldagem com o Sensor de Fluxo de Pó

O Sensor de Fluxo de Pó foi envolvido em duas operações práticas de soldagem PTA-P. Uma delas empregando alimentação de pó contínua (modo convencional) e outra, por sua vez, utilizando alimentação de pó intermitente. Ambas experiências foram conduzidas na bancada de soldagem PTA-P do LABSOLDA, de acordo com a configuração mostrada na Figura 5.1 deste trabalho.

A primeira consistiu em realizar a medição *online* de pó durante execução de um cordão de solda com o processo PTA-P, utilizando alimentação de pó contínua. Nesta atividade, o sinal do sensor foi plotado constantemente na tela do Computador, por meio do recurso *Plotter Serial* disponível na interface de desenvolvimento do Arduino. A avaliação do sinal foi realizada visualmente, na tela do Computador, acompanhando a estabilidade da onda de tensão em busca de interferências. A Tabela 5.12 apresenta os principais parâmetros da atividade de soldagem PTA-P com alimentação contínua de pó.

PARÂMETROS	ESPECIFICAÇÕES	UNIDADES
Corrente Média	200	A
Velocidade de Soldagem	20	cm/min
Rotação do Tambor	6,0	rpm
Taxa de Alimentação	0,940	kg/h
Vazão Arraste	3,0	l/min
Corrente na Fonte do Sensor	0,07	A
Taxa Aquisição	100	Hz
Consumível Stellite 6	-	-
Granulometria	(+50 – 150)	μm
Morfologia	Esférica	-

Tabela 5.12 – Parâmetros de ensaio de soldagem PTA-P empregando o Sensor de Fluxo de Pó durante alimentação contínua

Fonte: Elaboração própria.

A outra atividade foi baseada em realizar um cordão de solda com alimentação intermitente de pó. Tal experiência foi realizada com finalidade de saber se o sensor é capaz de acusar perturbações de alimentação com magnitude suficiente para refletir em falhas nas soldas. O acionamento do ADP foi realizado de forma sincronizada com o arco principal, sendo ambos desabilitados ao final da execução de um cordão retilíneo de aproximadamente 150 mm de extensão. A sincronização foi utilizada para garantir correlação entre variações na geometria da solda e o perfil de alimentação. A Tabela 5.13 apresenta os principais parâmetros da atividade de soldagem PTA-P com alimentação intermitente de pó.

PARÂMETROS	ESPECIFICAÇÕES	UNIDADES
Corrente Média	200	A
Velocidade de Soldagem	20	cm/min
Rotação de Pulso	20	rpm
Tempo de Pulso	1,75	S
Rotação de Base	0	rpm
Tempo de Base	1,75	S
Taxa de alimentação média	1,514	kg/h
Vazão Arraste	3,0	l/min
Corrente na Fonte do Sensor	0,07	A
Taxa Aquisição	100	Hz
Consumível Stellite 6	-	-
Granulometria	(+50 – 150)	μm
Morfologia	Esférica	-

Tabela 5.13 – Parâmetros de ensaio de soldagem PTA-P empregando o Sensor de Fluxo de Pó durante alimentação intermitente

Fonte: Elaboração própria.

5.2 ANÁLISE SOBRE OS ALIMENTADORES DE PÓ

Aspectos relativos à função de alimentação de pó (por parte dos ADP's de Tambor e de Esteira) foram investigados em termos metrológicos e operacionais. Os estudos analíticos citados, envolveram manipulação de consumíveis tradicionais e, também, de materiais alternativos. Aspectos morfológicos e noções granulométricas dos particulados, adotados nas atividades científicas, podem ser visualizados na

Figura 5.10. Já a Tabela 5.14 organiza estas informações, além de relacioná-las a outras características de interesse científico.

Figura 5.10 – Aspectos morfológicos e noções granulométricas dos pós selecionados: a) Inconel 625; b) Stellite 6; c) Inox 430; d) Inox 316L; e) Inox 316L Fino; f) Base Fe-Ni.



(c)

(f) (e)

(d)

Fonte: Elaboração própria.

Material	Morfologia	Granulometria	D. Aparente	Classificação
Inconel 625	Esférica	(45 – 125) µm	3,94 g/cm ³	Padrão PTA-P
Stellite 6	Esférica	(50 – 150) µm	3,90 g/cm³	Padrão PTA-P
Inox 430	Esférica	(50 – 150) µm	3,67 g/cm³	Padrão PTA-P
Inox 316L	Esférica	(50 – 150) µm	3,61 g/cm³	Padrão PTA-P
Inox316L Fino	Esférica	(11 – 45) µm	3,68 g/cm ³	Alternativo
Base Fe-Ni	Irregular	(5 – 500) µm	2,00 g/cm ³	Alternativo

Tabela 5.14 – Principais características dos pós usados nas análises dos ADP's.

Fonte: Elaboração própria.

No que se refere às análises metrológicas, abrangem exames a respeito do comportamento da taxa de alimentação, tanto em função da rotação de seus mecanismos de manipulação, quanto em função do consumo do pó estocado em seus reservatórios. Já no que tange às análises operacionais, envolvem averiguações relativas ao comportamento da taxa de alimentação de pó, em função da vazão do gás de arraste e da presença de vibrações do motor de passo. Ainda dentro do contexto das análises operacionais, averiguações sobre qualidade de transporte pneumático, além de atividades práticas de soldagem, foram empreendidas objetivando completa caracterização dos ADP's estudados nesta tese de doutorado. As referidas análises metrológicas e operacionais são detalhadas nas próximas sessões.

5.2.1 Taxa de Alimentação de Pó em Função da Rotação

Esta atividade consistiu em investigar a evolução da vazão de pó, em termos mássicos e volumétricos, dispensada pelos ADP's em função da rotação de seus mecanismos de dosagem. Tais ensaios foram realizados, essencialmente, com objetivo de confrontar curvas de materiais diferentes dosados com o mesmo ADP, além de comparar curvas de ADP's diferentes operando com o mesmo material. O confronto das curvas de materiais diferentes com mesmo ADP foi realizado para detectar influências da natureza de cada particulado no desempenho dos mecanismos de manipulação. Além de aspectos morfológicos e granulométricos, propriedades magnéticas dos pós também podem interferir na dosagem dos ADP's, uma vez que

afetam a escoabilidade de sólidos particulados. Já a comparação das curvas de ADP's diferentes, operando com o mesmo material, foi obtida para identificar qual o mecanismo apresenta melhor desempenho para cada pó selecionado. As atividades anteriormente mencionadas foram realizadas utilizando a bancada de soldagem PTA-P, na configuração mostrada pela Figura 5.11.



Figura 5.11 – Bancada de soldagem PTA-P configurada para levantamento da taxa mássica em função da rotação.

Fonte: Elaboração própria.

As rotações dos ADP's eram reguladas via IDE do Arduino, no Computador e acionados, por sua vez, pela Central de Controle e Acionamento. O procedimento consistia em acionar o ADP, formando um fluxo de pó (alimentação) na mangueira de transporte pneumático que, por seu turno, encaminhava as partículas para um recipiente disposto sobre o prato de uma balança de precisão. Esta consiste no modelo Mark S3201®, do fabricante BEL Engineering, dotada com resolução de 0,1 g

e reprodutibilidade 0,05g [57]. A mangueira foi envolta em um tubo metálico para manter rigidez e alinhamento estáveis durante os ensaios. Os parâmetros de ensaios estão relacionados, por seu turno, na Tabela 5.15.

PARÂMETROS	VALORES	UNIDADES
Faixa de Rotação do Tambor	3 a 15	rpm
Incremento de Rotação do Tambor	3	rpm
Faixa de Rotação da Esteira	1 a 5	rpm
Incremento de Rotação da Esteira	1	rpm
Vazão de Gás de Arraste	3,0	l/min
Massa Inicial de Pó no Silo	1000,0	g

Tabela 5.15 – Parâmetros empregados durante levantamento de curvas de taxa de alimentação em função da rotação dos ADP's

Fonte: Elaboração própria.

A taxa mássica de alimentação de pó foi obtida via filmagem do *display* da balança de precisão. A evolução do valor de massa foi filmada e, posteriormente, os dados de interesse foram extraídos com auxílio do *software* VLC Player®, o qual permite execução dos arquivos de vídeo *frame* por *frame*. A taxa mássica (Txm), calculada pela equação 5.3, consistiu em tomar dados de massa inicial (m_i) e final (m_f), associados a seus respectivos momentos inicial (t_i) e final (t_f). Para cada rotação foram realizados 6 experimentos, os quais fornecem um valor médio em cada caso.

$$Txm = \frac{m_f - m_i}{t_f - t_i} \tag{5.3}$$

Entretanto, a taxa volumétrica (TxV), neste trabalho, foi calculada por meio da equação 5.4, considerando a taxa mássica (Txm) obtida e, também, a densidade aparente (ρ_{po}) do pó usado.

$$TxV = \frac{Txm}{\rho_{po}} \qquad (5.4)$$

5.2.2 Monitoramento de Ciclo Completo de Operação

Esta atividade consistiu em investigar o comportamento da taxa mássica de pó dispensada pelos ADP's, durante o completo consumo do material estocado em seus reservatórios. Tais ensaios foram realizados, não só para verificar perfis e estabilidade da vazão mássica durante regime, mas também para identificar particularidades no comportamento desta grandeza durante o início e o final do consumo do material estocado. As referidas atividades foram conduzidas na bancada de soldagem PTA-P do LABSOLDA, usando a configuração mostrada pela Figura 5.12.



Figura 5.12 – Bancada de soldagem PTA-P configurada para monitoramento de ciclo completo de operação

Fonte: Elaboração própria.

O procedimento baseou-se em estocar uma porção de pó no interior do reservatório do ADP e acionar seu mecanismo em rotação constante, impondo um jato de partículas contínuo sobre o Sensor de Fluxo de Pó até a completa descarga de todo o conteúdo. A saída da mangueira de transporte pneumático, na qual foi instalado o sensor, foi mantida apontada para o interior do recipiente (responsável pela captação do pó utilizado). Já a rotação do ADP foi programada via IDE do Arduino, no Computador, enquanto o acionamento foi realizado pela Central de Controle e Acionamento. No que diz respeito ao Sensor de Fluxo de Pó, foi alimentado pela Fonte (em modo corrente constante), cuja tensão foi monitorada ao longo de todo o ensaio também pela Central. A Tabela 5.16 relaciona todos os parâmetros envolvidos nos ensaios de monitoramento de ciclo completo de operação, executados da mesma maneira para os ADP's de Tambor e Esteira. Deve-se salientar que o monitoramento de ciclo completo de operação foi realizado somente uma vez para cada ADP.

PARÂMETROS	ESPECIFICAÇÕES	UNIDADES
Material	Inconel 625	-
Rotação do ADP de Tambor	10	rpm
Rotação da Esteira	3	rpm
Taxa Mássica Nominal	1,5	kg/h
Massa Inicial de Pó no Silo	850,0	g
Vazão de Gás de Arraste	3,0	l/min
Corrente da Fonte	0,07	A
Taxa de Aquisição	100	Hz

Tabela 5.16 – Parâmetros empregados em monitoramento da taxa de alimentação durante descarga completa dos materiais contidos nos reservatórios

Fonte: Elaboração própria.

5.2.3 Influência da Vibração do Motor de Passo

O escopo do presente trabalho abrange, também, determinar a influência de vibrações, típicas do acionamento por motor de passo, sobre a taxa de alimentação

de pó fornecida pelos ADP's estudados. Além de dimensionar os impactos da presença de vibrações sobre a intensidade de fluxo de pó, estes ensaios objetivam, também, detectar se o recurso de suavização de vibrações (*Smooth*) pode prevenir ocorrência de fenômenos indesejados. A bancada de ensaios, configurada para realização destas experiências, é apresentada na Figura 5.13. Já os parâmetros usados nos referidos experimentos estão agrupados na Tabela 5.17.

Figura 5.13 – Bancada de soldagem PTA-P configurada para investigação de influência de vibração do motor de passo



Fonte: Elaboração própria.

PARÂMETROS	ESPECIFICAÇÕES	UNIDADES
Material	Inconel 625	-
Níveis de <i>Gap</i> do ADP Tambor	1,0 e 1,5	mm
Faixa de rotação dos ADP's	0,2 a 5,0	rpm
Incremento entre rotações	0,2	rpm
Vazão de Gás de Arraste	3,0	l/min
Massa Inicial de Pó no Silo	1000,0	g

Tabela 5.17 – Parâmetros usados durante investigação sobre influências de vibração do motor de passo

Fonte: Elaboração própria.

Os ensaios consistiram, basicamente, em medir a massa dispensada pelo ADP em estudo, durante um intervalo de tempo, em diferentes rotações dos mecanismos manipuladores de pó. Tais experiências, no caso do ADP de Tambor, foram realizadas para dois níveis de *Gap* diferentes (1,0 e 1,5 mm). Ademais, os procedimentos se basearam em acionar o ADP, formando um fluxo de pó (alimentação) na mangueira de transporte pneumático que, por seu turno, encaminhava as partículas para um recipiente disposto sobre o prato de uma balança de precisão. A mangueira foi envolta em um tubo metálico para mantê-la rígida, com posicionamento estável de sua extremidade no interior do recipiente. O dispositivo de filmagem, por sua vez, foi mantido em um suporte, de modo a registrar a evolução da massa indicada pelo *display* da balança. As rotações dos ADP's eram reguladas via IDE do Arduino, no Computador e acionados pela Central de Controle e Acionamento.

5.2.4 Influência da Vazão de Gás de Arraste

Embora a literatura aconselhe evitar o uso de vazão de Gás de Arraste próximas ao limite máximo [4], eventualmente, ocorre necessidade de regulá-la em patamares acima dos valores típicos (2,0 l/min). Isto porque, o aumento da taxa de alimentação tende a reduzir a rigidez dos jatos de pó. Assim, para devolver robustez ao fluxo de partículas, pode-se usar até 5,0 l/min de vazão de Gás de Arraste (limite da válvula de controle da Digiplus A7). Em decorrência destes fatos, julgou-se

coerente investigar se a variação da vazão do Gás de Arraste pode interferir no desempenho dos mecanismos de dosagem dos ADP's.

Os testes foram conduzidos na mesma bancada usada para as análises da taxa mássica em função da rotação, já apresentada na Figura 5.11. A taxa mássica de alimentação de pó foi obtida via filmagem do *display* da balança de precisão. A evolução do valor de massa foi filmada e, posteriormente, os dados de interesse foram extraídos com auxílio do *software* VLC Player®, o qual permite execução dos arquivos de vídeo *frame* por *frame*. A taxa mássica (Txm), calculada pela equação 5.5, consistiu em tomar dados de massa inicial (m_i) e final (m_f), correspondentes aos valores inicial (t_i) e final (t_f) do respectivo intervalo de tempo. Para cada nível de rotação foram realizados 6 experimentos, os quais forneceram valor médio em cada caso.

$$Txm = \frac{m_f - m_i}{t_f - ti} \tag{5.5}$$

Os experimentos descritos foram realizados para os dois ADP's, mantendo sob controle as condições elencadas na Tabela 5.18. Os consumíveis de solda, selecionados para as análises da influência da vazão de gás de arraste sobre as propriedades de dosagem dos ADP's, foram o Inox 316L Padrão e o Inox 430. Para cada material, conservando a mesma rotação, foram realizadas sequências de 6 medidas de massa em 5 níveis de vazão de Gás de Arraste.

PARÂMETROS	ESPÉCIFICAÇÕES	UNIDADES	
Materiais	Inox 316L e 430	-	
Rotação do Tambor	15	rpm	
Rotação da Esteira	5	rpm	
Vazão de Gás de Arraste	1 a 5	l/min	
Incremento Vazão Gás	1	l/min	
Massa Inicial de Pó no Silo	720	g	

Tabela 5.18 – Parâmetros empregados em investigações sobre influências da vazão de Gás de Arraste sobre taxa de alimentação fornecida pelos ADP's

5.2.5 Análise Visual de Fluxo de Pó em Transporte Pneumático

Embora o perfil de alimentação de pó também possa ser quantificado por outros métodos de avaliação realizados neste trabalho, a análise visual ainda se mostra válida. No caso de variações consideráveis na densidade do fluxo de pó, o olho humano é capaz de detectar falhas, cuja duração ocorre em frações de segundo. A despeito de se tratar de um método apenas qualitativo, fornece noção do comportamento da taxa de alimentação em termos instantâneos.

Por conta das vantagens descritas, o método de análise visual foi aplicado na qualificação do fluxo de pó em regime de transporte pneumático. Tal estratégia fundamenta-se em observar a saída da linha de transporte, contemplando o fluxo de pó de forma anteposta a um fundo escuro. O principal intuito reside na obtenção de noções comparativas, entre diferentes condições de formação do jato de pó. Neste sentido, foram realizados testes em que ambos ADP's foram sujeitos a operação com mesmo material, além de ensaios em que materiais diferentes foram manipulados pelo mesmo ADP. No primeiro caso, as comparações foram realizadas entre jatos produzidos pelo ADP de Tambor e pelo ADP de Esteira, em operação com pó de Inox 316L Padrão, em taxa de alimentação semelhantes. Já no segundo caso, as comparações foram realizadas entre jatos de pó produzidos com Inox 316L Padrão e Inox 316L Fino, utilizando o ADP de Esteira. Os parâmetros gerais dos ensaios estão relacionados na Tabela 5.19.

PARÂMETROS	ESPECIFICAÇÕES	UNIDADES	
Rotação do Tambor	15	rpm	
Rotação da Esteira	4	rpm	
Taxa Mássica Aproximada	2,250	kg/h	
Vazão de Gás de Arraste	3,0	l/min	
Massa Inicial de Pó no Silo	720	g	

Tabela 5.19 – Parâmetros constantes durante análise visual do fluxo de pó em transporte pneumático

5.2.6 Atividades Práticas de Soldagem com os ADP's

O desempenho dos ADP's, estudados no presente trabalho, foi validado também por intermédio de atividades de soldagem. Tais operações objetivaram refletir características operacionais do ADP de Tambor e do ADP de Esteira, em soldas produzidas com parametrização típica do processo PTA-P.

Os ensaios foram conduzidos na bancada PTA-P do LABSOLDA, já ilustrada pela Figura 5.1. Com relação às condições, os principais parâmetros utilizados estão elencados na Tabela 5.20. As atividades consistiram em realizar revestimento de uma das faces, de peças produzidas a partir de barra chata de aço carbono com 3/8" de espessura. As peças possuem dimensões 75 e 120 mm de largura e comprimento, respectivamente. Os revestimentos foram formados por série de cordões filetados sobrepostos.

No caso do ADP de Tambor, foi realizado revestimento de somente uma peça. Nesta atividade, o consumível utilizado foi o Inox 316L Padrão. As soldas resultantes devem ilustrar a capacidade do ADP de Tambor, na tarefa de alimentar o processo PTA-P com pós tradicionais. Já no caso do ADP de Esteira, foram realizados revestimentos de duas peças. Em uma delas, o material de aporte adotado, também foi o Inox 316L Padrão. Contudo, a outra foi revestida com o Inox 316L Fino (alternativo). Os recobrimentos resultantes devem revelar as potencialidades do ADP de Esteira, em alimentar o processo PTA-P, com pós tradicionais e alternativos.

PARÂMETROS	ESPECIFICAÇÕES	UNIDADES	
Corrente de Soldagem	230	A	
Taxa de Alimentação	1,4	kg/h	
Velocidade de Soldagem	83	cm/min	
Vazão de Gás de Arraste	3,0	l/min	
Vazão de Gás de Proteção	13,0	l/min	
Distância Bico-Peça	11,0	mm	

Tabela 5.20 – Principais parâmetros de soldagem empregados em atividades prática	IS
envolvendo os ADP's de Tambor e Esteira	

5.3 ANÁLISE DA VÁLVULA DE CONTROLE DINÂMICO DE PÓ

As análises a respeito da Válvula de Controle Dinâmico de Fluxo de Pó visaram, principalmente, caracterizar as propriedades de atuação desta como válvula proporcional. Outro objeto de análise consistiu na averiguação do limite máximo de frequência de operação utilizando, como referência, o limiar de frequência de pulsação de corrente da fonte de soldagem Digiplus A7. As referidas atividades foram conduzidas na bancada PTA-P do LABSOLDA, cuja configuração é ilustrada pela Figura 5.14. As seções a seguir discorrem sobre ambos métodos experimentais.

Figura 5.14 – Bancada configurada para análise da Válvula de Controle Dinâmico de Pó



Fonte: Elaboração própria.

5.3.1 Análise de Proporcionalidade entre Fluxo de Pó e Acionamento

As análises da Válvula de Controle Dinâmico de Fluxo de Pó como dispositivo proporcional consistiram em medir a taxa de alimentação de uma das vias de saída em função da posição angular do Obturador. Como mostrado na Figura 5.14, o ADP foi conectado à válvula pela linha de transporte pneumático. Às vias de saída desta última foram conectadas mangueiras apontadas para dois recipientes, sendo um deles disposto sobre o prato de uma balança de precisão e outro auxiliar (para receber o pó desviado).

Durante o procedimento de ensaio, inicialmente, a válvula era posicionada (via programação) pela central de controle e acionamento. Consistiu em filmar o *display* de uma balança de precisão. Deste modo, a indicação dos valores de massa podia ser associada ao tempo de vídeo, para cada posição do Obturador. A equação 5.6 permitiu o cálculo da taxa mássica (Txm), a partir dos valores mássicos inicial (mi) e final (mf) observados em um intervalo de tempo delimitado por um valor inicial (ti) e um valor final (tf). A operação escrita foi realizada 3 vezes para cada posição do Obturador, viabilizando obtenção de valores médios para a massa de pó dispensada. Em função da bifurcação da linha de transporte pneumático a vazão de arraste foi regulada na válvula de gás da bancada em 5,0 l/min. Desta forma, uma vazão de aproximadamente 2,5 l/min era mantida em cada via, garantindo condições de transporte pneumático em ambas.

$$Txm = \frac{m_f - m_i}{t_f - ti} \qquad (5.6)$$

Os principais parâmetros relativos aos ensaios de análise da Válvula de Controle Dinâmico de Fluxo de Pó estão elencados na Tabela 5.21. A tabela explicita a faixa de posicionamento do Obturador usada nos ensaios.

acionamento da válvulaPARÂMETROSVALORESUNIDADESRotação do Tambor15rpmTaxa de Alimentação2,240kg/h

0 a 180

15

500,0

5,0

grau

grau

g

l/min

Faixa de Posicionamento do Obturador

Massa Inicial de Pó no Silo

Vazão de Gás de Arraste

Incremento de Posicionamento do Obturador

Tabela 5.21 – Parâmetros empregados em análises de proporcionalidade entre fluxo de pó e acionamento da válvula

5.3.2 Análise de Frequência de Operação

Outro objeto de análise consistiu na averiguação do limite máximo de frequência de operação utilizando, como referência, o limiar de frequência de pulsação de corrente da fonte de soldagem. Os principais parâmetros deste ensaio também estão relacionados na Tabela 5.22.

Tabela 5.22 – Parâmetros empregados em análises de frequência de operação da Válvula de Controle Dinâmico de Fluxo de Pó

PARÂMETROS	VALORES	UNIDADES
Rotação do Tambor	15	rpm
Taxa de Alimentação	2,200	kg/h
Faixa de Movimentação do Obturador	30 a 150	grau
Frequência de Operação	5	Hz
Massa Inicial de Pó no Silo	500,0	g
Vazão de Gás de Arraste	5,0	l/min

Fonte: Elaboração própria.

A averiguação do limite máximo de frequência de pulsação consistiu em acionar a Válvula de Controle Dinâmico de Fluxo de Pó em uma frequência de 5 Hz, com o Obturador oscilando entre os ângulos 30° e 150°. Tal parâmetro de frequência foi adotado por equivaler ao limite máximo que a fonte de soldagem permite para configuração de corrente pulsada. Já a referida faixa angular foi escolhida por representar quase a totalidade do curso do Obturador, proporcionando alto contraste para visualização do efeito do dispositivo sobre o jato de pó. Esta análise buscou avaliar qualitativamente se a válvula é capaz de produzir o efeito de pulsação do jato de pó no limite máximo de frequência de operação. A averiguação foi efetuada visualmente, observando e filmando o comportamento do jato em uma das vias de saída da válvula.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos no decorrer do desenvolvimento deste trabalho, em concatenação com suas respectivas interpretações. Os referidos resultados representam a caracterização do Sensor de Fluxo de Pó, dos ADP's de Tambor e de Esteira e, também, da Válvula de Controle Dinâmico de Fluxo de Pó.

6.1 CARACTERIZAÇÃO DO SENSOR DE FLUXO DE PÓ

Esta seção abordará os resultados obtidos nos processos de análise empreendidos sobre o Sensor de Fluxo de Pó. Os ensaios objetivaram a caracterização de aspectos dimensionais e geométricos, comportamentos metrológicos, de instalação e operação (incluindo atividades práticas de soldagem PTA-P).

6.1.1 Influência de Parâmetros Geométricos do Centrifugador

Os resultados obtidos no monitoramento do sinal de tensão produzido pelo Sensor de Fluxo de Pó, perante variações em parâmetros geométricos do Centrifugador, estão expostos nos gráficos da Figura 6.1. Os parâmetros geométricos investigados referem-se ao diâmetro do centrifugador, além da altura e inclinação do teto deste. Número de pás, bem como seus raios de curvatura e comprimentos também figuram entre os parâmetros geométricos estudados.

O primeiro parâmetro, referente ao diâmetro do Centrifugador, apresenta efeito exposto na Figura 6.1 (a). A análise deste gráfico permite elucidar que, em uma faixa entre 25 e 60 mm, o aumento do diâmetro acresce a sensibilidade do sensor para uma mesma vazão de pó. Enquanto o Centrifugador de 25 mm não produziu um sinal perceptível, o de 60 mm provocou queda de tensão abaixo de 2,5 V. Tal influência pode ser atribuída, principalmente, ao momento que as partículas exercem sobre o eixo. Este aumenta com o acréscimo do raio, fazendo com que uma mesma quantidade de partículas produza mais carga sobre o eixo do motor.

Embora os testes tenham revelado influência altamente relevante do diâmetro do Centrifugador no desempenho do sensor, não deixaram evidente um parâmetro

mais adequado para este aspecto geométrico. Assim, um diâmetro maior que 60 mm pode fornecer sensibilidade consideravelmente maior ao sensor.





Fonte: Elaboração própria.

O segundo parâmetro, referente à altura do Centrifugador, apresenta efeito exposto na Figura 6.1 (b). A análise deste gráfico permite elucidar que, em uma faixa entre 10 e 20 mm, o acréscimo da altura aumenta a sensibilidade do sensor para uma mesma vazão de pó. Embora os três níveis ensaiados tenham estabilizado a tensão em patamares próximos, o Centrifugador de 20 mm de altura apresentou tensão nitidamente menor (em torno de 2,3 V). Tal influência pode ser atribuída, essencialmente, a extensão da área lateral das pás. Este fator pode aumentar o número de partículas que colidem contra as pás, aumentado a carga do Centrifugador sobre o eixo do motor. Entretanto, o parâmetro em questão não apresenta efeito linear sobre a sensibilidade do sensor, uma vez que as curvas não apresentam o mesmo espaçamento. É possível prever que um Centrifugador com altura de 30 mm, por exemplo, apresente efeito praticamente igual ao de 20 mm.

Já o terceiro parâmetro, referente ao ângulo de inclinação do teto do Centrifugador, apresenta efeito exposto na Figura 6.1 (c). A análise deste gráfico permite elucidar que, quanto maior o ângulo de inclinação, menor é a sensibilidade do sensor. Em termos estáticos, as curvas quase se sobrepuseram, contudo ainda é possível observar a tendência supracitada. A diferença maior foi observada no comportamento dinâmico, após a desativação do Tambor do ADP. É visível que, quanto maior o ângulo de inclinação do teto, mais lenta foi a resposta do sensor. O desempenho relatado pode ser atribuído, primordialmente, à colisão das partículas de pó também com o teto do Centrifugador. A ocorrência deste fenômeno faz com que mais fragmentos se depositem sobre a base do Centrifugador, sem colidir com as pás. Esta forma de carregamento do eixo do motor, além de não contribuir com a queda de tensão (provocada pela colisão das partículas com as pás), aumenta a inércia do rotor. Em consequência disto, o motor demora maior tempo para alcançar a velocidade em vazio.

O quarto parâmetro, por sua vez, referente ao número de pás do Centrifugador, apresenta efeito exposto na Figura 6.1 (d). A análise deste gráfico permite elucidar que, quanto maior o número de pás do Centrifugador, maior tende a ser a sensibilidade do sensor ao mesmo fluxo de partículas. Enquanto os centrifugadores de 10 e 15 pás forneceram queda de tensão em torno de 2,80 V e 2,55 V respectivamente, o Centrifugador de 20 pás baixou o sinal até aproximadamente 2,40 V. Pode-se atribuir o efeito descrito ao aumento do número de

colisões entre as pás e as partículas de pó, quando o número de pás é maior. Como o número de colisões com as paredes das pás é responsável pelo carregamento que mais interfere na queda de tensão, é esperado que o número de pás exerça influência considerável. Contudo, é possível observar, também no gráfico da Figura 6.1 (d), que um número ainda maior de pás pode fornecer maior sensibilidade, embora as curvas indiquem tendência à redução do efeito não muito acima de 20 pás. Em termos dinâmicos, as curvas da Figura 6.1 (d) permitem considerar que o número de pás pouco influencia na velocidade de resposta do sensor frente à interrupção do fluxo de pó. Embora a curva das 20 pás demore mais a chegar no valor de tensão em vazio, isto se deve, justamente, à maior sensibilidade oferecida.

O quinto parâmetro, referente ao raio de curvatura das pás do Centrifugador, apresenta efeito exposto na Figura 6.1 (e). A análise deste gráfico permite elucidar que, quanto mais curvada a superfície lateral das pás, menor é a sensibilidade do sensor para o mesmo fluxo de pó. É possível observar na figura que as curvas se estabilizam em patamares nitidamente diferentes. Enquanto a pá reta (raio ∞) produziu sinal em torno de 2,5 V e a pá de raio 20 mm estabilizou a tensão em aproximadamente 2,8 V, a pá de raio 15 mm não manteve o sinal abaixo dos 3 V.

A redução da sensibilidade em função do aumento do raio de curvatura das pás pode ser atribuída, essencialmente, a dois fatores: a decomposição da força que produz o momento sobre o eixo do motor e o rolamento das partículas. Ambos fenômenos são ilustrados na Figura 6.2. Um perfil reto para a pá, como ilustrado no item (a) desta figura, concede as melhores condições para que a força de impacto da partícula (Fip) produza o momento sobre o eixo do motor. A literatura reporta que esta força é a única responsável pela imposição de carga sobre o eixo do motor [58]. Contudo, quando a pá apresenta curvatura, a força de impacto da partícula é decomposta, como mostrado na Figura 6.2 (b). Assim, apenas a componente Fx pode gerar o momento sobre o eixo. Tal fato contribui para redução da carga imposta sobre o motor do sensor. Juntamente com o fenômeno descrito, a curvatura da pá promove o rolamento das partículas sobre a superfície, representado na Figura 6.2 (c). Desta forma o impacto é amortecido, deixando de gerar o momento que aplica carga sobre o eixo do motor.



Figura 6.2 – Redução da sensibilidade em função do aumento do raio de curvatura das pás: a) força de impacto total; b) decomposição da força de impacto; c) rolamentos de partículas

Fonte: Elaboração própria.

O sexto parâmetro, por fim, referente ao comprimento das pás do Centrifugador, apresenta efeito exposto na Figura 6.1 (f). A análise deste gráfico permite elucidar que o comprimento das pás praticamente não influencia no nível do sinal de tensão em regime. Nos três casos ensaiados, a tensão oscila em torno de 3,0 V. Tomando como principal fenômeno gerador de carga sobre o eixo do motor, o momento criado pelos impactos entre as partículas e as pás do Centrifugador [58] deve-se considerar que, quanto mais externa é a região de colisão maior é a influência do fluxo de pó sobre o sinal de tensão. Assumindo, então, que todas as partículas são obrigadas a atravessar o Centrifugador, uma pequena área lateral para as pás nos limites externos já é suficiente para gerar a máxima carga possível. Desta forma, por questões de sensoriamento, não é prioridade que a pá se estenda radialmente, embora seja relevante para a estrutura do Centrifugador. Em termos dinâmicos, podese afirmar que as pás mais curtas conferiram resposta mais rápida ao sensor, na fase de interrupção da alimentação de pó. Contudo, entre os comprimentos 14 e 4 mm, não é visível nenhuma diferença. Este comportamento pode estar associado a propriedades eólicas conferidas pelas pás. Quanto maior a área lateral destas, maior resistência a atmosfera gasosa impõe ao movimento do Centrifugador. Tal fato acaba impondo ao motor maior dificuldade para atingir a velocidade em vazio.

6.1.2 Influência de Parâmetros Geométricos da Cápsula

Os efeitos da geometria da Cápsula sobre o sinal de tensão do sensor são ilustrados pela Figura 6.3. Analisando o gráfico, pode-se observar que a Tampa com

parede vertical produziu maior queda de tensão e, por consequência, maior sensibilidade à mesma taxa de alimentação de pó. É possível observar que, enquanto a Tampa de parede inclinada estabilizou o sinal não muito abaixo de 4 V, a Tampa de parede vertical manteve o sinal próximo à 2,5 V.



Figura 6.3 – Influência de parâmetros geométricos da Cápsula sobre o sinal de tensão do sensor

Fonte: Elaboração própria.

Embora o protótipo não permita visualização do comportamento do pó em seu interior, atribui-se a diferença entre os sinais, essencialmente, à duas características: à inclinação da parede e ao volume interno da cápsula. No caso da cápsula que usa Tampa com parede vertical, é possível que grande número de partículas sejam rebatidas novamente em direção ao Centrifugador. Por consequência, o espaço interno reduzido, força este a operar imerso em uma nuvem de pó mais densa que, por sua vez, impõe maior carga ao eixo do motor. Já a Cápsula que usa Tampa com parede inclinada, as partículas tendem a serem rebatidas em direção ao Funil. Aliado à ausência dos rebatimentos em direção ao Centrifugador, o amplo espaço interno faz

este operar imerso em uma nuvem de pó mais rarefeita, impondo menor carga ao motor.

6.1.3 Caracterizações Metrológicas

As caracterizações metrológicas concernentes ao Sensor de Fluxo de Pó abrangem análises sobre o comportamento dinâmico e estático do sinal fornecido, em função da taxa mássica de alimentação de pó.

6.1.3.1 Caracterização do Comportamento Dinâmico

A Figura 6.4 apresenta, de forma gráfica, um ciclo completo de medição de fluxo de pó. Este envolve a fase inicial (disparo do ADP), o regime de alimentação (estabilidade do fluxo de pó) e a fase final (desligamento do ADP).



Figura 6.4 – Ciclo completo de medição de fluxo de pó

A fase inicial é identificada no gráfico pela queda brusca de tensão que ocorre pouco depois dos 6 segundos. A rotação do motor em vazio estabiliza a tensão do sensor em torno de 4,7 V. Quando o fluxo de pó atinge o Centrifugador, a carga gerada

Fonte: Elaboração própria.

pelas partículas é imposta sobre o eixo do motor instantaneamente, obrigando-o a assumir, de forma repentina, um nível de rotação mais baixo, correspondente à tensão média de 2,4 V. Já a fase final, como se pode contemplar no mesmo gráfico, é descrita por uma inclinação mais suave, em relação à da fase inicial, a qual inicia-se logo após os 36 s. A resposta dinâmica mais lenta da fase final é reflexo do momento de inércia do próprio conjunto eixo-centrifugador. Tal carregamento é consequente da aceleração do motor até alcançar novamente o regime de velocidade em vazio.

Ainda no gráfico da Figura 6.4, é possível observar que, durante a fase de regime de alimentação, o sinal de tensão do sensor apresenta caráter ondulatório. A referida oscilação, entretanto, deve-se a uma flutuação da taxa de alimentação de pó, provocada por irregularidades geométricas na rotação do Tambor. Tal fenômeno é abordado mais à diante neste trabalho, na seção de caracterização dos ADP's.

Já a Figura 6.5 representa, graficamente, o comportamento da tensão do Sensor de Fluxo de Pó frente a vários padrões de pulsação de material provocados, por sua vez, pelo acionamento intermitente do ADP de Tambor.



Figura 6.5 - Ciclo completo de medição de fluxo de pó

Uma comparação visual das curvas permite constatar que apenas a curva verde, de período T 9,5 s (4,25 s com Tambor parado e 4,25 s com Tambor girando), chega a atingir os patamares coerentes com a taxa de alimentação imposta. Neste caso, embora os perfis de subida e descida se apresentem semelhantes, nota-se diferenças em relação à velocidade de resposta. Na fase de descida da curva é possível admitir que esta atinge o nível de regime mais rapidamente, indicando a taxa de alimentação imposta pelo ADP no último segundo do trecho. Já na fase de subida, pode-se considerar que a curva alcança o patamar de 4,5 V indicando, por um breve momento, taxa de alimentação zero. Atribui-se a maior velocidade de resposta do sensor na fase de descida à repentina imposição de carga gerada, por seu turno, pela chegada abrupta do fluxo de partículas ao Centrifugador. Já a fase de subida, provocada pela ausência repentina de pó no Centrifugador, depende somente da resposta natural do motor do sensor, que atinge sua velocidade em vazio ao final do período de 4,25 s.

O mesmo comportamento pode ser observado, ainda nitidamente, na cuva T 7,5 s, embora seja possível visualizar que os patamares de taxa de alimentação máxima e zero não são completamente atingidos. A curva T 5,5 s comprova esta tendência. Esta, por sua vez, quase atinge o patamar de taxa de alimentação máxima, influenciada pela imposição repentina do fluxo de partículas pelo ADP. Contudo, não há tempo suficiente para o motor do sensor atingir a velocidade em vazio, de modo que a curva mal atinge os 4,0 V. Ao se reduzir ainda mais o período de pulsação do ADP, como demonstra a curva T 3,5 s, já não são atingidos mais os patamares mínimo e máximo de alimentação de pó. Tal fenômeno, que se manifesta agravado na curva T 1,5 s, leva ao deslocamento completo da curva para o patamar médio de 3,0 V, revelando uma medida incoerente, se comparada a curva de alimentação contínua T 0 s.

Embora o sensor não ofereça resposta dinâmica suficiente para fornecer valores absolutos do fluxo de pó em períodos inferiores a 5 s, variações de 1,5 s mostram-se capazes de modificar seu comportamento típico. Sendo assim, o sinal produzido ainda pode indicar anomalias na alimentação de pó durante o processo de soldagem, uma vez que estas ocorram com frequências inferiores a 1 Hz.
6.1.3.2 Caracterização do Comportamento Estático

A caracterização do comportamento estático do Sensor de Fluxo de Pó depende de conhecimento prévio da massa dispensada pelo ADP de Tambor em função da rotação. A Figura 6.6 apresenta esta relação, dentro da faixa de rotação compreendia entre os níveis 0 e 20 rpm. Tais dados foram extraídos durante calibração do referido ADP (pesagem da massa de pó dispensada em função da rotação do Tambor).



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 6.7 ilustra a curva característica da tensão fornecida pelo Sensor de Fluxo de Pó, em função da rotação do Tambor do ADP.



Figura 6.7 – Curva característica da tensão do sensor em função da rotação do tambor do ADP

Fonte: Elaboração própria.

No gráfico, é possível observar que a tensão do motor do sensor cai de acordo com o aumento da taxa de alimentação de pó (consequente do incremento da rotação do Tambor). Contudo, a queda de tensão não se mostrou linear, mas sim, com decréscimo aproximadamente logarítmico. Em uma análise visual mais apurada da Figura 6.7, é possível distinguir três trechos específicos da curva. Até 5 rpm a tensão do sensor cai mais bruscamente com comportamento aproximadamente linear, indicando um intervalo de mais alta sensibilidade. De 5 a 17 rpm, embora a curva ainda mantenha caráter quase linear, a inclinação apresenta-se mais atenuada, refletindo que, nesta região, o sensor apresenta sensibilidade menor. Por fim, o trecho final, de 17 a 20 rpm, envolve uma região um pouco mais instável do gráfico. O sensor volta a apresentar maior sensibilidade, entretanto, já não é possível assumir que o comportamento da curva é linear.

A Figura 6.8, por sua vez, ilustra a curva característica da taxa mássica de alimentação de pó, em função da tensão fornecida pelo sensor. Neste gráfico estão plotadas, além da curva de taxa mássica média, curvas auxiliares que delimitam a faixa de repetibilidade do sensor, permitindo visualizar a amplitude dos erros de medição. Uma curva de tendência proposta por *software* também é apresentada, a

qual corresponde à equação (e seu respectivo coeficiente R²) expostos na região gráfica.



Figura 6.8 – Curva característica da taxa mássica de alimentação de pó em função da tensão do sensor

Fonte: Elaboração própria.

Valendo-se da relação entre rotação e taxa mássica de alimentação, levantada previamente em procedimento de calibração do ADP, estas foram dispostas no eixo y do gráfico. Os valores de Tensão do sensor foram distribuídos no eixo x, uma vez que se trata do valor que pode ser lido na fonte de alimentação do motor CC.

O gráfico da Figura 6.8 ainda mostra que a taxa de alimentação decresce com o aumento da tensão sobre o motor do sensor. A taxa máxima de alimentação empregada nos testes, de 2,700 kg/h, corresponde a 2,311 V, enquanto o motor girando em vazio (taxa de alimentação zero) eleva a tensão até 4,761 V.

A faixa de repetibilidade do sensor se apresenta visualmente estreita e regular, indicando que os erros são baixos e mantêm quase sempre a mesma magnitude, ao longo de toda a faixa de medição. Deve-se considerar que a faixa de repetibilidade, nos níveis mais altos de taxa de alimentação, apresenta variações mais

acentuadas. Tal comportamento é atribuído a desvios-padrão mais amplos, ocorridos nesta região. O local da curva que apresenta maior erro se trata do ponto formado pela tensão 2,355 V e 2,648 kg/h. Nesta posição, a repetibilidade vale ±0,034 kg/h, o que representa um erro de medição inferior a ±1,3%.

A expressão adotada para modelar matematicamente o comportamento do sensor perante variações de taxa mássica entre 0 a 2,700 kg/h, é reescrita na forma da equação 6.1. Esta foi encontrada via tratamento de dados em planilha virtual. Nela, Txm indica taxa mássica de alimentação, enquanto S denomina a tensão do sensor. Consiste em um polinômio de quinto grau que descreve o fenômeno com exatidão correspondente a um coeficiente R² de 0,9992.

$$Txm = 0,256S^5 - 4,6737S^4 + 33,491S^3 - 117,16S^2 + 197,93S - 125,92$$
(6.1)

A exposição da equação 6.1 é justificada pela sua imprescindível relevância para este trabalho. Como poderá ser visto mais adiante neste capítulo, algumas análises acerca dos ADP's e da Válvula de Controle Dinâmico de Pó, contaram com o auxílio do Sensor de Fluxo de Pó. Isto porque é conveniente que os resultados sejam interpretados em termos de taxa mássica de alimentação. Para tanto, como a tensão do sensor é informada via Monitor Serial, seus valores (S) podem ser agrupados em planilha eletrônica. Posteriormente, na mesma planilha, podem ser aplicados à equação, a qual retorna a taxa de alimentação (Txm) correspondente.

6.1.4 Influência da Vazão de Gás de Arraste

A Figura 6.9 apresenta um gráfico que descreve o comportamento da tensão do Sensor de Fluxo de Pó em função de diferentes níveis de vazão de gás de arraste.

No que tange ao comportamento em regime, não é possível assumir que a vazão de gás de arraste influencie no sinal do sensor. Esta afirmação se baseia no fato de que todas as curvas se sobrepõem quase que completamente. Por outro lado, nas fases inicial e final dos ensaios, é notório que há uma tendência à estabilidade em patamares cada vez menores de tensão, à medida em que se usa maiores níveis de vazão de gás de arraste. Se tomadas as médias das curvas de 2 e 5 l/min (as mais afastadas entre si nos dois segundos finais dos ensaios), de 4,431 V e 4,292 V,

respectivamente, e aplica-las na equação do sensor, os valores retornados são respectivos 0,069 e 0,161 kg/h. Sendo assim, quando exposto a uma vazão de gás de arraste de 5 l/min, o sensor mediu 92 g/h a mais que no nível mais baixo de vazão. O comportamento relatado indica que um aumento de vazão durante o processo de soldagem pode induzir o sensor a indicar fluxo de partículas, mesmo com a alimentação totalmente interrompida.



Figura 6.9 - Comportamento da tensão do sensor em função da vazão do gás de arraste

Fonte: Elaboração própria.

Atribui-se este comportamento, essencialmente, à influência das variações da pressão interna do sensor sobre as propriedades eólicas do Centrifugador. Neste sentido, o incremento da vazão de gás de arraste tende a aumentar a pressão no interior da Cápsula, fazendo com que a atmosfera interna ofereça maior resistência à rotação do Centrifugador. Tal fato, por seu turno, obriga o motor a assumir uma velocidade em vazio menor (já que a corrente é mantida constante), produzindo um sinal de tensão mais baixo (mesmo na ausência de pó).

Na presença de fluxo de pó, a influência do fenômeno descrito sobre o padrão de sobreposição das curvas é quase imperceptível. Isto ocorre porque, de acordo com a curva característica de tensão do sensor em função da rotação (na Figura 6.7), a sensibilidade é maior quanto mais a medição se aproxima da região de operação em vazio.

6.1.5 Influência do Ângulo de Instalação

A Figura 6.10 demonstra graficamente o comportamento da tensão do Sensor de Fluxo de Pó em função do ângulo de instalação deste, em relação ao eixo vertical.



Figura 6.10 - Comportamento da tensão do sensor em função do ângulo de instalação



Uma comparação das curvas do gráfico leva a constatar que os sinais de tensão produzidos pelo sensor, nas posições vertical (0 graus) e inclinada (33 graus), são praticamente equivalentes. Desta forma, pode-se assumir que a inclinação do sensor, dentro da faixa ensaiada, não interfere no sinal gerado.

Se tomadas as médias das curvas de 0 e 30º (correspondentes ao trecho 12 a 34 s) de 3,898 V e 3,872 V, respectivamente, e aplica-las na equação do sensor, os valores retornados são respectivos 0,398 e 0,412 kg/h. Sendo assim, quando exposto a uma inclinação de 30º, o sensor mediu apenas 14 g/h a mais que no nível mais baixo de vazão. Esta diferença, a nível de processo de soldagem, é desprezível.

6.1.6 Influência da Aceleração da Gravidade

A Figura 6.11 representa graficamente o comportamento da tensão do Sensor de Fluxo de Pó em função da aceleração da gravidade.



Figura 6.11 - Comportamento da tensão do sensor em função da aceleração da gravidade

Uma análise comparativa das curvas do gráfico leva a constatar que os sinais de tensão produzidos pelo sensor, para os três comprimentos de mangueira testados se equiparam. No gráfico, é possível visualizar que as curvas geradas pelas mangueiras de 20 e 400 mm se sobrepõem quase em sua totalidade. Embora a curva fornecida pela mangueira de 200 mm esteja acima da faixa de sobreposição, não é correto considerar que a queda de tensão é menor neste caso. Uma última análise do gráfico da Figura 6.11 elucida que houve um *offset* na regulagem da corrente inicial

Fonte: Elaboração própria.

do motor do Sensor de Fluxo de Pó. Assim, para o caso da mangueira de 200 mm, uma correção matemática pode deslocar a curva até a região de sobreposição. Se tomadas as médias das curvas de 20 e 400 mm (correspondentes ao trecho 12 a 34 s) de 3,894 V e 3,877 V, respectivamente, e aplica-las na equação do sensor, os valores retornados são respectivos 0,400 e 0,410 kg/h. Sendo assim, quando exposto a uma queda 400 mm maior, o sensor mediu apenas 10 g/h a mais que no nível de queda mínimo.

Perante a análise supracitada pode-se considerar que a contribuição da gravidade no carregamento do Centrifugador pode ser desprezada. Atribui-se, este resultado, ao fato de que o impacto vertical das partículas sobre a base do Centrifugador é irrelevante para o carregamento do eixo do motor. A literatura reporta que apenas os impactos entre as partículas e as pás são capazes de gerar momento [58], fenômeno primordial para estimular o sensor.

6.1.7 Influência de Movimento Oscilatório

A Figura 6.12 representa graficamente o comportamento da tensão do Sensor de Fluxo de Pó em função de alguns patamares de frequência de agitação deste.

Apesar da sobreposição dos sinais, ainda são visíveis as curvas de 1 Hz, 3 Hz e 4Hz. A tendência das curvas a se afastarem da zona de sobreposição, no gráfico, indica que a agitação provocada no sensor interfere, de forma branda, no sinal de tensão gerado. Esta afirmação se baseia, essencialmente, na ocorrência de dois eventos: a queda de tensão em função da frequência na operação em vazio; e o comportamento contrário na fase com fluxo de pó.

Na fase sem fluxo de pó (início e fim), ocorre que estas não permanecem em um mesmo patamar. Tal fenômeno é atribuído a um ligeiro *offset* na corrente do motor do sensor operando em vazio. Considerando, então, as tensões médias das curvas de 1 e 4 Hz (que aparecem mais afastadas no gráfico) nos primeiros 4 s dos ensaios, comprova-se que taxas mássicas partem de 0,068 e 0,116 kg/h, respectivamente.

Já na fase de regime (com presença de fluxo de pó) as curvas se estabilizam em ordem oposta. Se tomadas as médias das curvas de 1 e 4 Hz, os valores retornados via equação são respectivos 0,466 e 0,414 kg/h. Sendo assim, quando exposto a uma oscilação de 4 Hz, o sensor mediu 52 g/h a menos que no nível mais baixo de agitação (com presença de fluxo de pó). Adicionando a correção do *offset* a este resultado (a qual vale 48 g/h), o erro de medição chega a atingir exatamente 100 g/h. Tal valor representa 10% dos níveis tipicamente empregados no processo PTA-P, em atividades laboratoriais, que giram em torno de 1 kg/h. Desta forma, não deve ser desprezado.



Figura 6.12 - Comportamento do sinal do sensor em função da frequência de oscilação

Fonte: Elaboração própria.

6.1.8 Influência Sobre Transporte Pneumático

As análises visuais do comportamento do pó, na saída da linha de transporte pneumático, permitiram detectar que o Sensor de Fluxo de Pó exerce efeito benéfico sobre as flutuações mais rápidas, que ocorrem com frequências acima de 0,5 Hz.

A Figura 6.13 ilustra variações de densidade do fluxo de pó expelido, com e sem sensor, usando o ADP de Esteira. Nos itens (a) e (b) desta figura (sem sensor) é possível distinguir, visualmente, uma diferença de densidade do jato. O primeiro apresenta-se mais nítido, enquanto o segundo mostra-se um pouco esmaecido. Tal fenômeno caracteriza uma variação momentânea de fluxo e, por consequência, da

taxa de alimentação. Já entre os itens (c) e (d) da mesma figura (com sensor), não é possível distinguir visualmente uma diferença clara.



Figura 6.13 – Influência do sensor sobre flutuações instantâneas no transporte pneumático



A atenuação de irregularidades do fluxo de partículas em transporte pneumático pode ser atribuída, primordialmente, à centrifugação do pó e à variação da velocidade do gás de transporte, ocorrentes no interior do sensor. Acredita-se que ambos fatores favorecem a criação de uma nuvem de partículas aproximadamente uniforme na atmosfera interna da Cápsula. Uma variação momentânea da densidade desta nuvem provocada, por sua vez, por uma falha instantânea da alimentação, pode ser insignificante em relação à quantidade de material que se precipita e escoa no funil do sensor.

A ação benéfica do Sensor de Fluxo de Pó sobre o transporte pneumático de partículas pode ser comparada à de um dispositivo chamado Fluidizador concebido, justamente, para atenuar perturbações de alimentação de pó em um ADP de Válvula Rotativa. Ambos foram desenvolvidos em um mesmo trabalho [9]. O efeito do Fluidizador também consiste no amortecimento de variações instantâneas da alimentação pela formação de uma nuvem de pó. Contudo, este fenômeno é uma consequência do princípio de medição do Sensor de Fluxo de Pó.

Em contrapartida, o Sensor de Fluxo de Pó não é capaz de atenuar as flutuações inerentes do perfil alimentação do ADP de Tambor. A Figura 6.14 relaciona os sinais de tensão obtidos na medição da taxa de alimentação diretamente do ADP (curva 1SENSOR) e, em outro caso, passando por um sensor instalado em série,

anteriormente ao que está fornecendo o sinal medido (curva 2SENSORES). Uma análise da figura permite constatar que, com exceção de um atraso de medição, o sensor intermediário não provoca efeito algum sobre o perfil de alimentação de pó.



Figura 6.14 – Influência do sensor sobre flutuações de longo período no transporte pneumático

Fonte: Elaboração própria.

6.1.9 Soldagem com o Sensor de Fluxo de Pó

A Figura 6.15 expõe um momento de um procedimento de soldagem PTA-P, no qual o Sensor de Fluxo de Pó mede a taxa de alimentação durante o processo. Na figura é possível identificar o sensor e seu sinal no monitor do Computador, enquanto a operação de soldagem é simbolizada pela luminosidade emitida pelo arco elétrico. Neste caso foi empregado um perfil constante de alimentação de pó (ADP de Tambor), refletido pela curva de medição impressa no Monitor Serial. A operação descrita simboliza que o Sensor de Fluxo de Pó possibilita o monitoramento da taxa mássica de alimentação de consumível, durante soldagem PTA-P.



Figura 6.15 – Emprego do Sensor de Fluxo de Pó no monitoramento da taxa de alimentação durante soldagem PTA-P

Fonte: Elaboração própria.

Já a Figura 6.16 associa a curva de medição da taxa de alimentação de pó (durante procedimento de soldagem PTA-P) com o respectivo depósito resultante. O perfil de alimentação de pó neste processo foi intermitente, acionando-se o ADP de Tambor em um período de 3,5 s (1,75 s com tambor parado e 1,75 s com Tambor girando).

Em consequência da semelhança de parâmetros, a curva de medição de taxa de alimentação de pó resultante é aproximadamente igual à curva T 3,5 s, da Figura 6.5. Da mesma forma pode-se observar que, devido à resposta dinâmica lenta do sensor, a curva não representa os patamares máximos e mínimos de taxa de alimentação adotados no processo. Contudo, a referida curva apresenta um perfil que pode ser associado ao cordão de solda, como sugere a Figura 6.16. As linhas verticais tracejadas amarelas indicam o sincronismo dos pontos mais baixos de tensão (pulsos

de alimentação) com os picos do cordão de solda, produzidos pela alimentação intermitente.

O resultado obtido permite concluir que, mesmo que o sensor não indique a tensão correspondente à taxa de alimentação utilizada (na frequência empregada neste ensaio), é capaz de refletir oscilações de alimentação que durem 3,5 s ou mais. Tal característica pode ser útil no monitoramento do processo de soldagem, uma vez que variações da geometria da solda podem ser sincronizadas com oscilações do sinal do sensor.





Fonte: Elaboração própria.

6.2 CARACTERIZAÇÃO DOS ALIMENTADORES DE PÓ

Nesta seção serão apresentados os resultados correspondentes às avaliações realizadas acerca dos ADP's. As análises permitiram caracterizar o comportamento da taxa de alimentação em função do descarregamento contínuo do reservatório, além de definir os perfis de vazão mássica e volumétrica de pó em função

da rotação de seus mecanismos de dosagem. Aspectos de desempenho operacional perante variações do gás de arraste também foram definidos. Por fim, investigações qualitativas a respeito das condições de transporte pneumático e respectivos ensaios de soldagem PTA-P foram também empreendidas. Todos os ensaios foram conduzidos de modo a permitir comparações entre os dois modelos de alimentadores, dentro das possibilidades.

6.2.1 Taxa de Alimentação de Pó em Função da Rotação

Os resultados referentes às análises do comportamento da taxa de alimentação, conferido por cada ADP, em função da rotação de seu mecanismo manipulador, serão interpretados tanto em caráter mássico quanto volumétrico. Entretanto, os desempenhos dos ADP's de Tambor e de Esteira serão tratados em seções distintas, abordadas a seguir.

6.2.1.1 Taxa de Alimentação de Pó em Função da Rotação do Tambor

A Figura 6.17 apresenta as curvas de taxa mássica de alimentação de pó em função da rotação, fornecidas pelo ADP de Tambor, durante operação com os materiais relacionados na legenda do gráfico. Em relação a estes ensaios, é importante salientar que o ADP de Tambor não foi capaz de operar com os pós alternativos selecionados. Interrupções de alimentação causadas por defeitos de escoamento, como Arco e Caminho de Rato, impediram a conclusão dos testes.

Uma análise geral da Figura 6.17 permite constatar que, em função da rotação do Tambor, a taxa mássica de alimentação varia linearmente para todos os consumíveis (padrão PTA-P). O comportamento mais discrepante foi apresentado pelo consumível Inox 430, o qual atingiu apenas pouco mais que 1,5 kg/h com o Tambor girando a 15 rpm. Em busca de descobrir o motivo deste comportamento, a pilha de pó foi examinada pela escotilha do ADP. Através desta, foi possível observar que algumas partículas mantinham-se aderidas ao canal de descarga, de forma semelhante a limalhas de aço quando atraídas por campo magnético. De fato, um teste com ímã provou ser o Inox 430 o único material, dentre os demais que compõem o gráfico, a apresentar propriedades ferromagnéticas.



Figura 6.17 – Taxa mássica em função da rotação do Tambor do ADP

Fonte: Elaboração própria.

Assim, como a única fonte de magnetismo presente no ADP é o motor de passo, foi feito o teste mostrado na Figura 6.18. O teste consistiu em remover o Tambor e lançar uma pequena porção de pó Inox 430 sobre a peça do Canal de Descarga. O procedimento foi realizado com e sem o motor conectado ao ADP.

Na Figura 6.18 (a) é mostrado que, quando o motor é acoplado ao ADP este magnetiza a peça do Canal de Descarga que, por sua vez, mantém partículas aderidas a ela e entre si mesmas. Já a Figura 6.23 (b) lustra que, quando o motor não está acoplado ao ADP, o Canal de Descarga não é magnetizado e, com isso, as partículas não permanecem retidas na peça. Como conclusão, o fenômeno de atração magnética é responsabilizado pela peculiaridade do comportamento da curva de taxa mássica do Inox 430. De acordo com a literatura, a imersão de um sólido particulado ferromagnético no interior de um campo magnético aumenta as forças de coesão entre as partículas, reduzindo sua escoabilidade [59,60].

Figura 6.18 – Magnetização de partículas de pó Inox 430 (ferromagnético) no Canal de Descarga do ADP de Tambor: a) magnetização por presença do motor; b) Sem aderência de partículas devido à ausência do motor



Fonte: Elaboração própria.

O comportamento da taxa de alimentação apresentado pelos materiais Stellite 6 e Inconel 625 foram praticamente iguais. Ambos atingiram taxas mássicas próximas a 2,500 kg/h em rotação de 15 rpm do Tambor. Este nível de variação da dosagem já não foi obtido com o Inox 316L, chegando a apenas 2,260 kg/h. Neste caso, a diferença da evolução da taxa mássica em comparação às dos outros dois pós não é atribuída a qualquer dificuldade por parte do ADP. Ocorre que a densidade aparente do Inox 316L (de 3,61 g/cm³) é menor que a do Stellite 6 e do Inconel 625 (de 3,94 e 3,90 g/cm³, respectivamente). Sendo assim, é natural que a taxa mássica, para uma mesma rotação, seja menor quanto menor for a densidade aparente do pó. Para garantir que o fenômeno relatado se deve somente às diferenças das densidades aparentes, a Figura 6.19 expõe as curvas referentes à taxa de alimentação volumétrica para os mesmos materiais.



Figura 6.19 – Taxa volumétrica em função da rotação do Tambor do ADP

Fonte: Elaboração própria.

A sobreposição das curvas de taxa volumétrica correspondentes ao Stellite 6, Inconel 625 e Inox 316L indica que o volume de dosagem (ou o formato da pilha de pó) praticamente não se altera com as variações de densidade aparente apresentadas pelos materiais testados. Aliado a isto, pode-se dizer que o ADP de Tambor fornece dosagem volumétrica (média) de alta precisão, se desconsiderar o problema ocorrido com o Inox 430 (que pode ser corrigido em um novo projeto). Esta afirmação baseiase no fato de que, a partir dos dados obtidos nas análises, o ADP dosou um volume médio de 0,738 cm³ por volta do Tambor, com desvio-padrão de meros 0,006 cm³. Este valor de desvio-padrão representa apenas 0,8% do volume médio.

Por outro lado, como a curva de taxa volumétrica do Inox 430 manteve menor inclinação, mesmo que este pó apresente densidade aparente de 3,67 g/cm³ (ainda maior que a do Inox 316L), conclui-se que a atração magnética influencia no volume de dosagem. Desta forma, a atração entre partículas provocada pelo magnetismo da peça do Canal de Descarga induz à formação de uma pilha de pó de menores dimensões.

A análise do volume dosado em função de 1 rotação completa do Tambor, para cada material, pode ser feita com auxílio da Tabela 6.1. Esta relaciona os consumíveis, com seus respectivos volumes médios, além de valores absolutos e percentuais dos desvios-padrão.

	Inox 316	Stellite 6	Inox 430	Inconel	316 Fino	Fe-Ni
M (ml)	0,739	0,744	0,468	0,732	-	-
D.P. (ml)	0,010	0,011	0,013	0,009	-	-
D.P. (%)	1,312	1,379	1,748	1,283	-	-

Tabela 6.1 – Análise do volume dosado por 1 rotação do Tambor

Fonte: Elaboração própria.

Uma comparação dos valores médios leva a constatar que apenas o pó Inox 430 destoa significativamente. Esta tendência corrobora o comportamento da curva deste material na Figura 6.17, influenciada pela atração magnética sofrida no Canal de Descarga.

Com relação aos desvios-padrão absolutos, pode-se assumir que se assemelham em magnitude. Neste sentido, o pó Inconel 625 mostrou tendência a conferir maior repetibilidade ao ADP de Tambor, possivelmente, devido às suas características padronizadas. Por outro lado, o Inox 430 apresentou propensão a conferir menor repetibilidade ao ADP de Tambor, provavelmente, em razão da sua baixa escoabilidade (afetada pela atração magnética).

Por fim, em termos de valores proporcionais, os desvios-padrão não chegaram a 2 %. A maior disparidade também foi apresentada pelo pó Inox 430, possivelmente, devido à influência da atração magnética sobre sua escoabilidade.

6.2.1.2 Taxa de Alimentação de Pó em Função da Rotação da Esteira

A Figura 6.20 apresenta as curvas de taxa mássica de alimentação de pó em função da rotação, fornecidas pelo ADP de Esteira durante operação com os materiais relacionados na legenda do gráfico. Como primeira análise deste gráfico, é seguro afirmar que a taxa mássica de alimentação varia linearmente para todos os consumíveis selecionados.



Figura 6.20 - Taxa mássica em função da rotação da Esteira do ADP

Fonte: Elaboração própria.

Apesar do desempenho afirmado anteriormente, o início da curva do pó alternativo Fe-Ni (em 1 rpm) apresenta um tênue desvio. Como o restante da curva se comporta sem perturbações, considera-se que o referido fenômeno pode ser causado por variações no volume de dosagem na fase inicial dos ensaios. Tais variações podem ser decorrentes de acomodações da porção de pó estocado dentro do Reservatório e sobre a Esteira, induzidas, primordialmente, pelo movimento do próprio pó nos primeiros ciclos de funcionamento. A literatura reporta que particulados, compostos de partículas de amplas faixas granulométricas e formato irregular, são mais propensos à movimentos de acomodação [61].

O outro material alternativo adotado nos testes, o Inox 316L Fino, também apresentou ligeiro desvio em sua curva. Neste caso, o último nível de rotação (de 5 rpm) forneceu taxa mássica média pouco abaixo da esperada. Embora as análises não tenham subsídios para explicar este fenômeno, a literatura considera que materiais de granulometria refinada tendem a sofrer maior impacto de agentes que agravam a coesividade das partículas [61]. Neste sentido, a umidade pode ser um dos agentes mais presentes no Inox 316L Fino (pelo fato deste não ser conservado em estufa), podendo reduzir a sua escoabilidade. Assim, o aumento da rotação da Esteira pode ter alcançado um nível em que não há tempo suficiente para a estabilidade volumétrica da pilha de pó, devido à escoabilidade reduzida. Por consequência, o ADP passa a dosar menos material por rotação, flexionando a curva da taxa mássica.

É possível distinguir, também, diferenças consideráveis dos patamares de taxa mássica no nível máximo de rotação da Esteira. Basicamente, observa-se a formação de três grupos distintos. O grupo de curvas mais inclinadas, do Inconel 625 (3,94 g/cm³) e Stellite 6 (3,90 g/cm³), alcançara taxas em torno de 3,000 kg/h. Logo mais abaixo, agrupam-se as curvas dos aços Inox (316L Padrão - 3,61 g/cm³; 316L Fino - 3,68 g/cm³; 430 - 3,67 g/cm³), alcançando cerca de 2,750 kg/h. Isoladamente, situa-se a curva do pó Fe-Ni (2,00 g/cm³), não chegando a atingir 1,500 kg/h. Os referidos agrupamentos são atribuídos, essencialmente, às semelhanças entre os valores de densidade aparente dos consumíveis que, quanto menores, reduzem a taxa mássica para uma mesma rotação, se conservado o mesmo volume de dosagem.

De fato, o grau de sobreposição das curvas na Figura 6.21, indica que o volume de dosagem é semelhante para todos pós testados. Esta afirmação baseia-se no fato de que, a partir dos dados obtidos nas análises, o ADP dosou um volume (médio) de 2,453 cm³ por volta da Esteira, com desvio-padrão de 0,278 cm³. Este valor de desvio-padrão representa pouco mais de 11% do volume médio. Considerando apenas os pós padrão PTA-P, o volume médio de dosagem por volta da Esteira passa a ser de 2,590 cm³, com desvio-padrão também de 0,278 cm³ (ainda acima de 10% do volume médio).



Figura 6.21 – Taxa volumétrica em função da rotação da Esteira do ADP

Fonte: Elaboração própria.

A análise do volume dosado em função de 1 rotação completa da Esteira, para cada material, pode ser feita com auxílio da Tabela 6.2. Esta relaciona os consumíveis, com seus respectivos volumes médios, além de valores absolutos e percentuais dos desvios-padrão.

	Inox 316	Stellite 6	Inox 430	Inconel	316 Fino	Fe-Ni		
M (ml)	2,645	2,577	2,589	2,548	2,459	1,900		
D.P. (ml)	0,081	0,077	0,086	0,081	0,094	0,086		
D.P. (%)	3,058	2,975	3,324	3,187	3,823	4,553		

Tabela 6.2 – Análise do volume dosado por 1 rotação da Esteira

Fonte: Elaboração própria.

Uma comparação dos valores médios leva a constatar que apenas o pó Fe-Ni destoa significativamente. Esta tendência corrobora o comportamento da curva deste material na Figura 6.20. Com relação aos desvios-padrão absolutos, pode-se assumir que se assemelham em magnitude. Neste sentido, o pó Stellite 6 mostrou tendência a conferir maior repetibilidade ao ADP de Esteira, possivelmente, devido às suas características padronizadas. Por outro lado, o Inox 316L Fino apresentou propensão a conferir menor repetibilidade ao ADP de Esteira, provavelmente, em razão da sua baixa escoabilidade.

Por fim, em termos de valores proporcionais, os desvios-padrão mantiveramse quase totalmente, em torno dos 3 %. A maior disparidade, desta vez, foi apresentada pelo pó Fe-Ni. Contudo, o motivo está relacionado com o baixo volume médio de dosagem, não indicando pior desempenho em relação aos outros materiais.

6.2.2 Influência da Vibração do Motor de Passo

Os resultados correspondentes às influências das vibrações provocadas pelo motor de passo, sobre a taxa de alimentação fornecidas pelos ADP estudados, serão apresentados em sessões separadas. A próxima sessão trata dos efeitos surtidos sobre o funcionamento do ADP de Tambor. Já a sessão subsequente, versa sobre os impactos das vibrações nas características operacionais do ADP de Esteira.

6.2.2.1 Influência da Vibração do Motor de Passo no ADP de Tambor

A Figura 6.22 exibe, de forma gráfica, os resultados alcançados nas experiências conduzidas para avaliar as influências da vibração do motor de passo sobre o ADP de Tambor. É importante enfatizar que as curvas de alimentação em função da rotação do ADP de Tambor foram levantadas, não só para as condições com e sem suavização, mas, também, para dois níveis de *gaps* diferentes. Para o *gap* de 1,0 mm, as curvas aparecem tracejadas, enquanto para o *gap* de 1,5 mm, as curvas apresentam-se contínuas.

Com relação ao *gap* de 1,0 mm, é possível observar na Figura 6.22 que a vibração do motor de passo induz o ADP de Tambor a fornecer taxa mássica consideravelmente maior. Tal afirmação é demonstrada pela grande diferença na evolução das curvas tracejadas. A título de exemplo, tomando a rotação de 2,8 rpm, a curva verde (*smooth*) atinge o ponto de 1,0 kg/h, enquanto a curva azul alcança 3,5

kg/h. Já no que concerne ao gap de 1,5 mm, o efeito de acréscimo na taxa de alimentação de pó, com presença de vibração do motor de passo, mostra-se ainda mais agravado. Tal afirmação é demonstrada pela grande diferença na evolução das curvas contínuas. Neste caso, tomando a rotação de 2,8 rpm, a curva amarela (smooth) atinge taxa mássica em torno de 1,5 kg/h, enquanto a curva vermelha ultrapassa os 7,0 kg/h.



Figura 6.22 – Influências da presença de vibração do motor de passo no ADP de Tambor

Fonte: Elaboração própria.

A influência da vibração proveniente do motor de passo pode ser visualizada na Figura 6.23. Esta figura mostra a visão da pilha de pó formada no gap do ADP, entre o canal de descarga do reservatório e a superfície curva do Tambor. A Figura 6.23 (a) ilustra a silhueta da pilha de pó formada durante operação em modo de suavização (smooth). É possível constatar que, nesta condição, a pilha de pó estabiliza-se de forma concentrada, distribuindo-se conicamente na região central do Tambor. Já a Figura 6.23 (b), por seu turno, ilustra a silhueta da pilha de pó formada durante operação com presença de vibração. Nesta circunstância, a pilha de pó estabiliza-se de forma mais espalhada, cobrindo toda região central do Tambor.

Perante os fatos relatados, é possível assumir que a vibração natural do acionamento por motor de passo é transmitida para o Tambor, uma vez que estes componentes são unidos por acoplamento rígido. Por sua vez, o Tambor propaga as vibrações para a pilha de pó, induzindo as partículas a se espalharem mais sobre a sua superfície. A pilha espalhada, no que lhe diz respeito, contém maior volume de pó e, por conta disto, o ADP acaba dispensado maior quantidade de material por revolução.



Figura 6.23 – Visão da pilha de pó formada no gap do ADP entre o canal de descarga do reservatório e a superfície curva do tambor

Fonte: Elaboração própria.

O desempenho operacional do ADP de Tambor sem a suavização das vibrações do motor de passo é considerado inadequado por duas razões principais.

Em primeiro lugar, quanto maior o volume de pó dispensado por volta do Tambor, mais grosseira se torna a resolução de regulagem da taxa de alimentação (para um mesmo incremento na rotação do ADP). Para efeito de análise, podem ser adotadas as curvas obtidas com *gap* de 1,0 mm até a rotação 3,0 rpm (região mais linear das curvas). Aliado a isto, deve-se considerar que a fonte de soldagem fornece faixa de regulagem até 50,0 rpm e incremento mínimo de 0,1 rpm. No caso sem vibração, a resolução média de alimentação mássica é de apenas 35 g/min por

incremento de 0,1 rpm. Por outro lado, com presença de vibração, um incremento de 0,1 rpm acrescenta 135 g/min na taxa mássica de pó.

O segundo motivo, que torna a vibração do motor de passo nociva ao desempenho do ADP de Tambor, consiste em irregularidades como as observadas na linearidade das curvas produzidas com vibração. Nos níveis de rotação mais altas dos ensaios, chegam a ocorrer picos de alimentação totalmente discrepantes das tendências. Neste sentido, com *gap* de 1,0 mm, ocorre na rotação 4,4 rpm, enquanto com uso de gap 1,5 mm, se manifesta na rotação de 3,0 rpm. Após estes picos, o ADP opera de forma incoerente, já que, um aumento na rotação implica em redução da taxa de alimentação. Os fenômenos responsáveis pela formação dos picos, nas curvas produzidas sob efeito de vibrações do motor de passo, não foram caracterizados neste trabalho. Contudo, são atribuídos a manifestações derivadas de vibrações, como frequências ressonantes. Estas são capazes de provocar movimentos de maior amplitude em rotações específicas, influenciando consideravelmente na dosagem de pó.

6.2.2.2 Influência da Vibração do Motor de Passo no ADP de Esteira

A Figura 6.24 representa, de forma gráfica, os resultados alcançados nas experiências conduzidas para avaliar as influências da vibração do motor de passo, sobre o ADP de Esteira.

Em primeira análise, é possível identificar diferença visível na evolução da taxa mássica em função da rotação da esteira para os dois casos. No maior patamar de rotação ensaiado (5,0 rpm), o desempenho do ADP de Esteira, sob efeito da vibração do motor de passo, atingiu em torno de 3 kg/h. Já utilizando o recurso *Smooth*, o ADP alcançou não mais que 2,750 kg/h no mesmo nível de rotação.

Por outro lado, é possível visualizar, também, que a curva obtida com uso do modo *Smooth* apresentou menores desvios, em relação à tendência (tracejada). Neste caso, apenas leves afastamentos, mais pronunciados nas rotações 2,8 e 3,6 rpm são observados. Em contrapartida, a curva obtida sob efeito de vibração

apresentou maiores desvios. Nestas circunstâncias, a curva chegou a apresentar três pontos seguidos abaixo da tendência, entre 2,8 e 3,2 rpm.



Figura 6.24 – Influências da presença de vibração do motor de passo no ADP de Esteira

Fonte: Elaboração própria.

Além das diferenças de desempenho operacional em função da rotação (perante suavização ou vibração do motor de passo) apresentadas graficamente, também foram observados outros fenômenos. O mais expressivo deles consistiu na diferença entre as quantidades de pó que se acumularam sobre a rampa (base) do ADP.

Durante ensaios realizados com uso do recurso de suavização de vibração do motor de passo, disponível no driver SRT8, foi percebia presença de poucas partículas sobre a rampa da Cápsula do ADP. A Figura 6.25 retrata o fenômeno mencionado. Sob estas condições, as partículas tendem a se aglomerar em duas posições preferenciais. Algumas acabam por se distribuírem, de maneira mais espalhada, nas proximidades do Funil. Já outras aglomeram-se, de forma mais concentrada, abaixo da região da polia movida. A causa do fenômeno não foi detectada, contudo, é atribuída à queda de partículas da Esteira. É possível que, após a queda das partículas, algumas permaneçam aderidas à Esteira. Estas devem ser induzidas à queda por movimentações mais bruscas da Esteira, provocadas, por sua vez, pelo reengrenamento desta às polias. Esta perspectiva justifica a maior concentração de partículas próxima à polia movida, pois esta é a região de engrenamento que não está alinhada ao funil.



Figura 6.25 – Partículas caídas sobre a rampa do ADP de Esteira durante ensaio sem vibração

Fonte: Elaboração própria.

Durante ensaios realizados sob influência da vibração do motor de passo, foi percebida presença de considerável quantidade de pó sobre a rampa da Cápsula do ADP. A Figura 6.26 retrata o fenômeno mencionado. Sob estas condições, a rampa é gradativamente coberta por muitas partículas, até que a porção de pó acaba por tomar forma de uma inundação.

Durante os ensaios com presença de vibração eram observadas partículas saltitando entre os dentes da Esteira, mais precisamente, na região em que os dentes estão voltados para cima. Atribui-se tal movimento das partículas à vibração da Esteira, transmitida a esta, por seu turno, pela Polia Motora (unida ao motor de passo por acoplamento rígido). Em sequência, é possível observar que as partículas

saltitantes acabam por cair das bordas da Esteira, depositando-se ao longo da rampa da Cápsula do ADP. Entretanto, não é possível observar como partículas de pó podem chegar a tal região da esteira. Neste sentido, uma hipótese plausível se baseia na possibilidade de partículas de pó verterem continuamente das bordas da Esteira, induzidas, por sua vez, pela vibração desta. Ainda seguindo este raciocínio, algumas partículas podem cair diretamente sobre a rampa, enquanto outras depositam-se sobre o suporte. Estas últimas são arrastadas pela esteira, até caírem sobre os dentes recém passados pela Polia Motora. No entanto, o montante de partículas presente na zona inundada nas proximidades da polia movida, aponta para ocorrência de outro fenômeno. Neste caso, acredita-se que a vibração da Esteira pode compelir partículas a rolarem para o lado oposto ao seu movimento, formando, por seu turno, a inundação de pó na região da Polia Movida.



Figura 6.26 – Inundação da rampa do ADP de Esteira com pó durante ensaio com vibração

Fonte: Elaboração própria.

6.2.3 Monitoramento Contínuo de Operação

A Figura 6.27 apresenta a curva de medição da taxa de alimentação de pó dispensada pelo ADP de Tambor, ao longo do consumo de 850 g de pó contido em seu reservatório.



Figura 6.27 – Monitoramento da taxa mássica de alimentação de pó em função do esvaziamento do reservatório do ADP de Tambor

Em uma primeira análise, duas características chamam atenção: a flutuação da taxa mássica média e a amplitude dos valores instantâneos.

As variações visíveis na taxa mássica média são representadas, no gráfico da Figura 6.27, pela linha tracejada amarela. Acompanhando-a pode-se observar, nos primeiros 6 minutos, que a taxa mássica cai, de uma média de 1,717 para 1,422 kg/h. Atribui-se esta queda inicial da taxa mássica à uma redução gradativa do volume da pilha de pó. Na literatura há informações que apontam para um efeito de compactação do pó durante a descarga, típico em regime de escoamento em funil [62,63]. Tal fenômeno tende a reduzir a escoabilidade (e o volume da dose) aos poucos, até que outros fatores o sobrepujam. A partir dos 6, até os 13 minutos, a média volta a subir com evolução gradual, alcançando 1,613 kg/h. Este aumento paulatino da taxa mássica é reflexo de um ganho progressivo do volume de dosagem. Tal fato é imputado, por sua vez, ao aumento da escoabilidade, em função da redução gradual da pressão imposta pelo montante de pó estocado, sobre as partículas em regime de pleno escoamento. O fenômeno descrito, que tende à estabilidade no decorrer do

Fonte: Elaboração própria.

ensaio, também é previsto em literatura [62,63]. Após isto, ocorre uma sequência de duas quedas, ambas se aproximando do patamar de 1,550 kg/h. Entretanto, ao fim dos 22 minutos de ensaio, as oscilações perdem destaque, de modo que passa-se a considerá-la estável, em um nível de 1,637 kg/h, até o início da região perturbada que abrange os três minutos finais da experiência.

Já a Figura 6.28 apresenta a curva de medição da taxa de alimentação de pó dispensada pelo ADP de Esteira, ao longo do consumo de 850 g de pó contido em seu reservatório. Em uma primeira análise, chamam atenção comportamentos semelhantes ao caso do ADP de Tambor: a flutuação da taxa mássica média e a amplitude dos valores instantâneos.

As variações visíveis na taxa mássica média são representadas, no gráfico da Figura 6.28, pela linha tracejada amarela. Acompanhando-a pode-se observar, nos primeiros 4 minutos, que a taxa mássica sobe, de uma média de 1,434 para 1,505 kg/h. Atribui-se esta ascensão inicial da taxa mássica à um aumento gradativo do volume da pilha de pó. A literatura reporta informações que apontam para um efeito de descompactação do pó durante a descarga, típico em tremonhas que operam em regime de escoamento em massa [62,63]. Tal fenômeno tende a aumentar a escoabilidade (e o volume da dose) aos poucos, até atingir estabilidade.

Dos 4 aos 13 minutos, ocorre uma flutuação negativa da taxa mássica média, atingindo valor de 1,431 kg/h, aos 9 minutos de ensaio. As análises não permitiram chegar a uma explicação plausível para este fenômeno. Também não foi encontrada em literatura, alguma informação que esclareça este comportamento.

De qualquer forma, a taxa mássica média seguiu sem perturbações consideráveis até os 31 minutos da experiência, mantendo um nível de 1,528 kg/h. Após este momento, a taxa mássica cai abruptamente até que, nos últimos momentos do ensaio, atinge o nível zero. A queda observada nos dois últimos minutos foi ocasionada pela falta gradual de pó. Neste caso, a porção estocada foi, aos poucos, tornando-se insuficiente para manter o volume de dosagem.



Figura 6.28 – Monitoramento da taxa mássica de alimentação de pó em função do esvaziamento do reservatório do ADP de Esteira

Fonte: Elaboração própria.

Quanto à amplitude dos valores instantâneos no caso do ADP de Tambor, o trecho mais ao final da curva (dos 25 aos 30 minutos) apresenta um desvio-padrão de 116 g/h (com média de 1,637 kg/h). Contudo, os valores extremos variam entre um mínimo de 1,2 a um máximo de 2,0 kg/h no mesmo trecho. Já com relação à amplitude dos valores instantâneos no caso do ADP de Esteira, o trecho mais estável da curva (dos 15 aos 30 minutos) apresenta um desvio-padrão de 119 g/h (com média de 1,485 kg/h). Entretanto, os valores extremos variam entre um mínimo de 1,9 kg/h no mesmo trecho.

Tais oscilações são inerentes, primordialmente, do comportamento dos sistemas mecânicos de dosagem dos alimentadores. Nas próximas seções serão exibidos, separadamente, os trechos inicial, final e central das curvas mostradas nas figuras 6.27 e 6.28. Os tempos de análise são de aproximadamente 1 minuto, o que gera o efeito equivalente a um *zoom*. Isto oferece melhores condições de análise do comportamento dinâmico da taxa mássica de alimentação de pó, principalmente, nos momentos mais críticos do ciclo de operação.

6.2.3.1 Trecho Inicial do Monitoramento do Ciclo de Operação

Observando o trecho inicial do ensaio, por meio da Figura 6.29, é possível afirmar que ambos ADP's evoluem a taxa mássica média, em direção ao regime de alimentação, com dinâmica praticamente equivalentes.

Figura 6.29 – Trecho inicial do monitoramento da taxa mássica de alimentação de pó em função do esvaziamento do reservatório dos ADP's



Fonte: Elaboração própria.

O comportamento que difere, na fase inicial, entre os alimentadores, consiste no deslocamento gradual da taxa mássica média. No caso do ADP de Tambor, é notório que o primeiro ciclo gira em torno de uma taxa de 1,750 kg/h enquanto o último, por sua vez, flutua sobre o nível de 1,500 kg/h. Já no que tange ao ADP de Esteira, o movimento da média é inverso. O primeiro ciclo oscila em torno de 1, 250 kg/h enquanto o último, por sua vez, mantém-se à volta do nível de 1,500 kg/h.

Ainda na fase inicial, chama atenção outra manifestação comum aos dois casos: a flutuação dos valores instantâneos da taxa de alimentação. Os fenômenos apresentam caráter regular em aspectos de frequência e amplitude. Em contrapartida, os perfis mostram-se distintos para cada ADP. De qualquer modo, a intersecção de algumas regiões das curvas não permite contemplar, de maneira clara, o perfil de

flutuação da taxa de alimentação, principalmente, no caso do ADP de Esteira. Contudo, a próxima sessão é dedicada, justamente, à análise destes fenômenos e suas causas.

6.2.3.2 Trecho Central do Monitoramento do Ciclo de Operação

Os comportamentos oscilatórios da taxa de alimentação de pó para os dois ADP's podem ser melhor comparados na Figura 6.30.

Figura 6.30 – Trecho central do monitoramento da taxa mássica de alimentação de pó em função do esvaziamento do reservatório dos ADP's



Fonte: Elaboração própria.

Nesta figura, foi isolado um trecho de 60 s da região central dos experimentos, além de provocado um deslocamento (matemático) da curva do ADP de Tambor (com intuito de facilitar a comparação, evitando a sobreposição). Desta forma, foi possível observar que ambos sinais apresentam comportamentos oscilatórios distintos e regulares.

caso do ADP de Tambor, o sinal apresenta comportamento No aproximadamente senoidal. Tal comportamento oscilatório é atribuído a imperfeições do mecanismo de dosagem, ilustradas na Figura 6.31. Foi constatado que o Tambor revoluciona de modo levemente excêntrico, Figura 6.31 (a), além de apresentar cambagem, Figura 6.31 (b). A excentricidade provoca deslocamento do centro real do Tambor (dc), fazendo com que a distância entre este e o Canal de Queda do Reservatório varie entre um mínimo (dt) e um máximo (Dt). A variação desta distância implica em inevitável variação da taxa de alimentação, uma vez que se trata da altura da pilha de pó. A cambagem, por sua vez, é provocada por imperfeição na perpendicularidade (ϕ T) entre o Tambor e o eixo do motor de passo. Como efeito, ocorre o bamboleamento do Tambor em movimento, alcançando deslocamentos laterais para esquerda (E) e direita (D) em função da rotação. Durante o movimento, o Tambor apenas passa rapidamente pela posição central (C), na qual deveria permanecer. O bamboleamento também modifica, periodicamente, o perfil do volume de dosagem, provocando variações cíclicas na taxa de alimentação de pó.



Fonte: Elaboração própria.

Da mesma forma, imperfeições do mecanismo de dosagem do ADP de Esteira são responsabilizadas pela flutuação (e seu perfil comportamental) da taxa de alimentação de pó. Neste caso, foram observadas duas complicações, as quais provocam o efeito esquematizado na Figura 6.32.



Figura 6.32 – Efeito das imperfeições do mecanismo de dosagem do ADP de Esteira sobre a altura da dose de pó

Fonte: Elaboração própria.

A primeira complicação consiste em leve excentricidade dos furos das polias dentadas. Tal efeito gera oscilação da região plana da esteira (abaixo do reservatório). De acordo com a rotação, tanto a Polia Movida quanto a Motora impõem deslocamentos verticais cíclicos na correia. Este fato faz com que o espaço entre a superfície plana e a extremidade do Canal de Queda oblongo varie entre um valor mínimo (dp) e um máximo (Dp). O referido espaço corresponde à altura da dose e, se variado, reflete em proporcional flutuação da taxa de alimentação de pó.

A segunda complicação, no que lhe diz respeito, consiste em imperfeições no engrenamento da Correia Impressa com as polias. Em rotações mais elevadas é possível observar um movimento de descida repentino da correia, principalmente na região da Polia Motora. Tal movimento é atribuído à mudança do padrão de encaixe entre os dentes dos componentes envolvidos.

6.2.3.3 Trecho Final do Monitoramento do Ciclo de Operação

A análise da Figura 6.33, referente ao trecho final dos ensaios, permite observar comportamentos instáveis da taxa de alimentação de pó nesta fase.



Figura 6.33 – Trecho final do monitoramento da taxa mássica de alimentação de pó em função do esvaziamento do reservatório dos ADP's

No caso do ADP de Esteira, é possível visualizar que a taxa mássica média diminui lentamente (todavia, visivelmente) até os 50 segundos do gráfico. Nos primeiros 10 s, a taxa média é de 1,506 kg/h enquanto, dos 40 aos 50 s, cai para 1,268 kg/h (uma queda de mais de 15%). A partir dos 50 s, a queda é brusca em direção ao zero. O comportamento descrito indica que a dosagem do ADP de Esteira é afetada gradativamente à medida em que a porção final do pó é consumida. Neste sentido, como a pilha de partículas deste ADP espalha-se ao longo de toda superfície plana da Esteira, a quantidade de pó vai deixado aos poucos de ser suficiente para formar a dose natural. Contudo, somente a completa falta de pó interrompe a alimentação.

Já no que tange ao ADP de Tambor nota-se, em sua curva correspondente, que a taxa de alimentação se torna perturbada em sua fase final. A taxa de alimentação é mantida na média de 1,736 kg/h nos primeiros 5 s. A partir deste momento, a alimentação é interrompida pelos próximos 25 s, restabelecendo-se com média de 1,931 kg/h por mais 5 s. Na sequência a alimentação novamente é paralisada e, embora apresente mais um pico, este não se sustenta e a taxa mássica cai, finalmente, a zero.

Fonte: Elaboração própria.
O comportamento supracitado indica que a porção final do material depende de agentes aleatórios para escoar sobre o Tambor. De fato, foram observadas, como mostrado na Figura 6.34, maior dificuldade de escoamento próximo ao tubo de pressurização do reservatório e ocorrência de avalanches das últimas camadas de partículas estagnadas. A presença do tubo de pressurização na tremonha torna o escoamento cada vez mais excêntrico e, por fim, tende a reter porções de pó em suas proximidades. Este fenômeno, aliado à estagnação das últimas camadas de partículas à parede da tremonha cônica por conta própria, interrompe a alimentação de pó em caráter instável. Espontaneamente, as avalanches ocorrem, gerando os picos de alimentação que caracterizam a fase final do consumo de pó do reservatório.

Figura 6.34 – Condições finais de escoamento de pó na tremonha do ADP de Tambor: a) excentricidade de escoamento por presença de tubo de pressurização; b) partículas estagnadas; c) avalanches de partículas



Fonte: Elaboração própria.

6.2.4 Influência de Vazão de Gás de Arraste na Dosagem dos ADP's

A partir do gráfico apresentado na Figura 6.35 não é possível assumir que a vazão de gás de arraste influencia na dosagem de pó do ADP de Tambor. Tomando como referência as taxas obtidas com a vazão de arraste de 1,0 l/min, em ambos os casos, os valores médios mantiveram-se próximos. As variações não apresentaram

tendência crescente ou decrescente em função do aumento da vazão de gás. No caso do Inox 430, a maior discrepância ocorreu no nível 2,0 l/min, no qual a taxa mássica média foi 62 g menor que o nível anterior. O limite superior foi obtido no nível 4,0 l/min, não chegando a 40 g de diferença. Por parte do Inconel 625, a discrepância das médias apresentou-se ainda menor, inferior à 25 g.

Já levando em consideração os resultados plotados no gráfico da Figura 6.36, é possível constatar que a vazão de gás de arraste influencia na dosagem de pó do ADP de Esteira, pelo menos, a partir de 3,0 l/min. Tomando como referência as taxas obtidas com a vazão de arraste de 1,0 l/min, em ambos os casos, pode-se dizer que, nos primeiros três níveis de vazão, não houve efeito significativo (inclusive, para o Inox 430, o ADP de Esteira repetiu os três valores médios). Em contrapartida, no nível 4,0 l/min, as médias se distanciaram da referência. Em 5,0 l/min, no caso do Inox 430, a média ultrapassou em quase 100 g e, no caso do Inconel 625, aumentou cerca de 200 g em comparação aos primeiros valores.





Fonte: Elaboração própria.



Figura 6.36 – Taxa mássica do ADP de Esteira em função da vazão de gás de arraste

Embora o protótipo do ADP de Esteira não permita uma observação clara do comportamento da pilha de pó, é possível que a vazão de gás de arraste influencie em sua formação. Neste sentido, quando a vazão de gás é acrescida ocorre, por consequência, um aumento na pressão interna do ADP (inclusive, no interior do reservatório). Admite-se, então, que o aumento de pressão força o pó a se acomodar sobre a Esteira, formando uma pilha maior. Por conta disto, o ADP é induzido a dispensar mais pó por volta da Esteira, à medida em a vazão de gás é incrementada.

6.2.5 Qualidade do Fluxo de Pó em Transporte Pneumático

A Figura 6.37 apresenta imagens retiradas de uma filmagem da saída da Linha de Transporte Pneumático, para observação do fluxo de partículas de Inox 316L Padrão fornecido pelo ADP de Tambor.

Fonte: Elaboração própria.

Figura 6.37 – Saída da Linha de Transporte Pneumático do ADP de Tambor operando com Inox 316L Padrão: a) oscilação de fluxo em fase esparsa; b) oscilação de fluxo em fase densa



Fonte: Elaboração própria.

No caso deste alimentador, nota-se que o fluxo de pó sofre suaves variações de densidade, sendo os ciclos aparentemente regulares, em torno de 5 s. Para proporcionar uma noção, a Figura 6.37 (a) mostra o jato de partículas em um momento em que o fluxo se apresenta em uma fase mais esparsa. A Figura 6.37 (b), por seu turno, exibe o jato de partículas em um instante em que o fluxo se apresenta em fase mais densa.

Embora difícil de distinguir visualmente a diferença entre a densidade dos fluxos apresentadas na figura, tal variação é atribuída às imperfeições do mecanismo de dosagem do ADP de Tambor. A excentricidade e a cambagem do Tambor, como visto em seções anteriores, acarretam em consideráveis variações na taxa de alimentação de pó. A consequente flutuação mássica do fluxo de partículas é refletida na oscilação de densidade dos jatos de pó, a qual pode ser notada visualmente.

Já a Figura 6.38 apresenta imagens retiradas de uma filmagem da saída da Linha de Transporte Pneumático, para observação do fluxo de partículas de Inox 316L Padrão fornecido pelo ADP de Esteira. Figura 6.38 – Saída da Linha de Transporte Pneumático do ADP de Esteira operando com Inox 316L Padrão: a) oscilação de fluxo em fase esparsa; b) oscilação de fluxo em fase



Fonte: Elaboração própria.

Por meio do monitoramento visual da saída da mangueira, foram percebidas variações na densidade do jato de pó. Contudo, no caso do ADP de Esteira, é possível observar que a densidade se torna gradativamente mais esparsa até um momento em que, subitamente, volta a se manifestar de forma mais expressiva. A Figura 6.38 (a) mostra um momento em que o fluxo de partículas apresenta-se mais esparso, enquanto a Figura 6.38 (b) exibe um instante em que o jato é mais denso.

As referidas oscilações de densidade do fluxo de pó são atribuídas às imperfeições do mecanismo de dosagem do ADP de Esteira. A excentricidade das polias e certo grau de incompatibilidade no engrenamento destas com a Esteira, como visto em seções anteriores, acarretam em consideráveis variações na taxa de alimentação de pó. A consequente flutuação mássica do fluxo de partículas é refletida na oscilação de densidade dos jatos de pó, a qual pode ser notada visualmente, de maneira mais acentuada que no caso do ADP de Tambor.

Por fim, a Figura 6.39 apresenta imagens retiradas de uma filmagem da saída da Linha de Transporte Pneumático, para observação do fluxo de partículas de Inox 316L Fino fornecido pelo ADP de Esteira. Neste caso, foram percebidas as maiores variações na densidade do jato de pó. A Figura 6.39 (a) mostra um momento em que o fluxo de partículas apresenta-se mais esparso, sendo quase imperceptível. Já a Figura 6.39 (b) exibe um instante em que o jato é consideravelmente mais denso.

Figura 6.39 – Saída da Linha de Transporte Pneumático do ADP de Esteira operando com Inox 316L Fino: a) oscilação de fluxo em fase esparsa; b) oscilação de fluxo em fase densa



Fonte: Elaboração própria.

As referidas oscilações de densidade do fluxo de pó são atribuídas, desta vez, não só às imperfeições do mecanismo de dosagem do ADP de Esteira. A excentricidade das polias e certo grau de incompatibilidade no engrenamento destas com a Esteira, como visto em seções anteriores, acarretam em consideráveis variações na taxa de alimentação de pó. Entretanto, uma averiguação visual do comportamento do Inox 316L Fino sobre a Esteira (através da escotilha do ADP), possibilitou constatar que este material flui de maneira diferente dos pós padrão PTA-P. Enquanto os materiais tradicionais formam uma cascata de pó aproximadamente laminar, ao cair da Esteira, o Inox 316L Fino apresentou um fluxo mais errático. Neste caso, a cascata era formada por blocos de partículas agrupadas. Como efeito disto, observou-se dosagem intermitente, decorrente de sucessivas avalanches de partículas. Este comportamento peculiar do Inox 316L Fino é atribuído não só à sua baixa escoabilidade, mas também à possível umidade retida no material.

A consequente flutuação mássica do fluxo de partículas é refletida na oscilação de densidade dos jatos de pó, a qual pode ser notada visualmente, de maneira mais acentuada que no caso do ADP de Tambor.

6.2.6 Desempenho dos ADP's em Soldagem PTA-P

A Figura 6.40 apresenta o revestimento produzido por soldagem PTA-P usando como consumível o pó Inox 316 L Padrão, alimentado pelo ADP de Tambor.

Figura 6.40 – Revestimento de Inox 316L Padrão composto por cordões filetados sobrepostos produzidos via processo PTA-P com ADP de Tambor



Fonte: Elaboração própria.

É possível observar que há defeitos somente na região inicial da solda. Tais defeitos (porosidade) podem estar associados à contaminação da atmosfera interna do ADP de Tambor com ar, durante o carregamento do seu reservatório com pó. Ao longo de todo restante da região revestida não há defeitos visíveis. Os cordões apresentam geometria regular, o que pode ser atestado pela uniformidade das marcas de sobreposição e pela regularidade do relevo da sua superfície.

Já a Figura 6.41 apresenta o revestimento produzido por soldagem PTA-P usando como consumível o pó Inox 316 L Padrão, alimentado pelo ADP de Esteira.

Figura 6.41 – Revestimento de Inox 316L Padrão composto por cordões filetados sobrepostos produzidos via processo PTA-P com ADP de Esteira



Fonte: Elaboração própria.

Como no caso do ADP de Tambor, é possível observar que há porosidade somente na região inicial da solda, provocado por motivo similar ao mencionado anteriormente. Contudo, ainda na fase inicial, podem ser vistos pontos em que houveram falhas de revestimento. Logo após o ponto de início e nas extremidades dos três primeiros cordões, há áreas em que não houve material suficiente para manter a molhabilidade da poça de fusão.

Os referidos defeitos podem estar associados à dois fatores principais: a superfície da peça ainda fria e as flutuações da taxa de alimentação apresentadas pelo ADP de Esteira. Pode ocorrer que, na fase inicial, o processo de soldagem seja mais sensível a perturbações na alimentação, devido à molhabilidade reduzida em função da baixa temperatura da peça. Assim, qualquer redução do volume da poça pode torna-la incapaz de sobrepor o cordão vizinho, formando as falhas circuladas na figura. Ademais, os cordões apresentam geometria regular, o que pode ser atestado pela uniformidade das marcas de sobreposição, além da regularidade do relevo da superfície do revestimento.

Por fim, a Figura 6.42 apresenta o revestimento produzido por soldagem PTA-P usando como consumível o pó Inox 316 L Fino, alimentado pelo ADP de Esteira.

Figura 6.42 – Revestimento de Inox 316L Fino composto por cordões filetados sobrepostos produzidos via processo PTA-P com ADP de Esteira



Fonte: Elaboração própria.

Como nos casos anteriores, é possível observar que há porosidade somente na região inicial da solda. Atribui-se estes defeitos, também à contaminação da atmosfera interna do ADP de Esteira com ar, durante seu carregamento com pó.

Neste revestimento, os defeitos iniciais se manifestaram de forma mais pronunciada. As irregularidades deformam a superfície do revestimento, produzindo uma região defeituosa. Contudo, os defeitos tornam-se menos frequentes à medida em que a solda se afasta da região inicial, com exceção da lateral localizada na parte inferior da figura. Neste flanco, três dos defeitos distribuem-se em alinhamento. Os dois últimos circulados, posicionam-se em direção cada vez mais ao centro. De qualquer forma, os cordões não apresentam geometria tão regular em comparação aos outros dois revestimentos. Suas marcas de sobreposição não são tão nítidas e seu relevo apresenta maior grau de irregularidades.

Ainda na Figura 6.42, apontadas com setas, as laterais do revestimento apresentam acabamento inferior aos outros dois casos. As perturbações da taxa de alimentação podem, nestas regiões, ter influenciado sobre variações no volume da poça. Assim, em momentos que esta é menor, não há material suficiente no local para cobrir a peça e sobrepor o cordão vizinho.

6.3 CARACTERIZAÇÃO DA VÁLVULA DE CONTROLE DINÂMICO

Nesta seção serão apresentados e interpretados os resultados referentes às avaliações acerca da Válvula de Controle Dinâmico de Fluxo de Pó. Os estudos priorizaram a caracterização em termos proporcionais, buscando quantificar o desvio de fluxo de partículas em função da posição do Obturador da válvula. Contudo, foram efetuadas, também, análises visuais do fluxo de pó em função do acionamento do referido atuador.

6.3.1 Desempenho Proporcional de Desvio de Fluxo de Pó

As subseções apresentadas a seguir discorrem sobre o desempenho proporcional, por parte da Válvula de Controle Dinâmico de Fluxo de Pó, perante função de desviar o jato de partículas, operando nas posições vertical e horizontal.

6.3.1.1 Desempenho Proporcional de Desvio de Fluxo em Posição Vertical

A Figura 6.43 caracteriza o desempenho do dispositivo como válvula proporcional, operando na posição vertical. A curva em azul, corresponde à via monitorada, a qual alimentava o recipiente da balança (esquerda).

O primeiro fenômeno observado consiste no fato de que, mesmo sem abertura do Obturador (ângulo zero), havia fluxo de pó na via esquerda, correspondente a uma taxa de alimentação de 400 g/h (quase 20% do fluxo total enviado à válvula pelo ADP). Tal incoerência de funcionamento, é atribuída a uma possível folga entre o Obturador e a galeria do Corpo da Válvula. Como o Obturador não é capaz de bloquear a passagem de gás, as partículas que atingem a folga são arrastadas através da via obstruída, formando um vazamento.





Fonte: Elaboração própria.

Outro comportamento que chamou a atenção reside no fato de que a taxa de alimentação mássica não se mostrou linear em função da abertura da via. É possível observar na curva azul que a taxa mássica pouco variou (menos de 5% da taxa total fornecida pelo ADP), enquanto o Obturador foi deslocado 60° (em torno de 33%). Por

outro lado, de 60 a 90°, a taxa mássica aumentou 27%, enquanto a abertura do obturador aumentou menos de 17%. Seguindo a análise da curva, de 90 a 180°, o comportamento é semelhante. De 90 a 120°, a taxa mássica sobe abruptamente sendo que, até 180°, pouco acréscimo é notado. Como se pode observar ainda nesta curva, mesmo com a via totalmente aberta, a taxa mássica não atinge 1,8 kg/h, quando se esperava a taxa de alimentação total fornecida pelo ADP (de 2,2 kg/h). Assim sendo, constata-se a ocorrência de vazamento, como no caso em que a via está totalmente fechada. Contudo, o vazamento mostrou-se ainda maior, cerca de 75 g/h. É possível que a folga entre o Obturador e as paredes da galeria do corpo da válvula na posição 180° seja maior que na posição 0°. Tal fenômeno pode ocorrer por efeito de leve excentricidade do Obturador.

Em uma última análise observa-se que, com o Obturador em 90°, a taxa mássica na via esquerda apresentou valor de 1,1 kg/h, metade da taxa máxima (2,2 kg/h). Neste ponto o dispositivo atua de acordo com o esperado, desviando o fluxo de partículas igualmente para as duas vias, quando o Obturador é posicionado no meio do seu curso.

6.3.1.2 Desempenho Proporcional de Desvio de Fluxo em Posição Horizontal

A Figura 6.44 caracteriza o desempenho do dispositivo de pulsação de pó como válvula proporcional, operando na posição horizontal. A curva em azul, corresponde à via monitorada, a qual alimentava o recipiente da balança (via esquerda).

Em termos gerais, o gráfico revela desempenho semelhante em relação ao comportamento da válvula na posição vertical. Isto significa que ocorreram os mesmos fenômenos relatados na seção anterior. Os vazamentos das vias obstruídas mostraram-se mais significativos com a válvula operando na posição horizontal. A taxa mássica com a via bloqueada é de 600 g/h (200 g/h maior que o caso anterior). A variação abrupta da taxa de alimentação com o Obturador entre as posições 60 e 120° também ocorreu, embora menos acentuada. O ponto médio da taxa mássica (1,1 kg/h) também coincidiu com o ponto médio de posição do Obturador (90°), indicando equilíbrio das vazões de pó nas duas vias nesta condição. Entretanto, excepcionalmente neste ensaio, houve um fato incoerente. Trata-se de uma redução

da taxa de alimentação quando a via monitorada fica, finalmente, completamente aberta. Ocorreu que, quando o Obturador passou de 165º para 180º, a taxa de alimentação diminuiu de 1,584 para 1,548 kg/h. Não foram encontradas explicações plausíveis para este fenômeno.



Figura 6.44 – Desempenho proporcional da Válvula de Controle Dinâmico de Fluxo de Pó em posição Horizontal

Fonte: Elaboração própria

6.3.2 Fluxo de Pó em Função da Frequência de Operação

A Figura 6.45 ilustra a investigação visual realizada para detectar os efeitos do acionamento da válvula sobre o jato de pó em uma das vias. Foi possível visualizar a pulsação de pó, comutando a posição do Obturador em uma frequência de 5 Hz, sendo esta a máxima que a fonte permite para configurar uma corrente pulsada. O campo angular de operação usado neste ensaio foi de 15º a 165º.

Na Figura 6.45 (a) é possível observar que, quando o batente aponta para a direita, o Obturador está bloqueando parcialmente a via monitorada, resultando em um fluxo esparso de partículas. A Figura 6.45 (b), por sua vez, apresenta a condição oposta. Neste caso, quando o batente aponta para a esquerda, o Obturador está

liberando quase totalmente a via monitorada, resultando em um fluxo denso de partículas.



Figura 6.45 – Análise visual do comportamento do fluxo de partículas em função da frequência de comutação do Obturador

Fonte: Elaboração própria.

De acordo com este ensaio, é possível constatar que a Válvula de Controle Dinâmico de Fluxo de Pó pode oferecer propriedades dinâmicas para atender às solicitações máximas de frequência do processo PTA-P. Em relação a isto, foi visível a interferência regular da válvula sobre o fluxo de partículas operando em 5 Hz, sendo este o limite máximo que a fonte de soldagem impõe na configuração de corrente pulsada. Já no que concerne à amplitude de movimento do Obturador, a faixa testada (15 a 165°) está próxima de um limite operacional, uma vez que, na prática, não é usual utilizar níveis de corrente de base próximos de zero.

7 CONCLUSÕES

De acordo com os estudos realizados e respectivos resultados obtidos, é possível declarar, de maneira geral, que a presente tese de doutorado cumpriu seus objetivos. Tal afirmação fundamenta-se nas contribuições científicas e tecnológicas produzidas, acerca dos componentes de sistemas de alimentação de pó desenvolvidos e estudados. Conclusões sobre cada um destes dispositivos serão abordadas de forma mais específica, separadamente, nas seções a seguir.

7.1 CONCLUSÕES SOBRE O SENSOR DE FLUXO DE PÓ

Diante dos resultados obtidos, é plausível declarar que o presente trabalho proporcionou um sensor de fluxo de pó, capaz de fornecer valor da taxa de alimentação de consumível, *online* à execução de soldas no processo PTA-P. A partir disto, é possível considerar que o sensor oferece potencial para tornar o referido processo, tecnologicamente, mais compatível com sistemas ciber-físicos e com redes de gerenciamento de informações na indústria 4.0. Semelhante propriedade também pode favorecer pesquisas científicas acerca do processo PTA-P, permitindo associação de defeitos em soldas com variações na alimentação durante o processo. Em caráter particular, com relação ao Sensor de Fluxo de Pó, pode-se levar em conta os fatos relatados a seguir.

- A assimilação de conhecimento, a respeito de medidores centrífugos de sólidos particulados, foi obtida como fruto da fase de pesquisa deste trabalho. Tal fato proporcionou o desenvolvimento de um sensor, além de apropriado ao sistema de soldagem, compatível com os perfis de fluxo de consumíveis do processo PTA-P. Por ser relativamente pequeno e leve, pode ser instalado na linha de transporte pneumático por simples encaixe com a mangueira;
- Foi possível caracterizar as propriedades metrológicas no que tange a limites e erro de medição, além dos comportamentos estático e dinâmico. No que se

refere aos limites de medição, o Sensor de Fluxo de Pó mediu taxas de alimentação entre 0 e 2,7 kg/h, com erro não maior que <u>+</u> 1,3% (em relação a valor médio correspondente). Em termos estáticos, é seguro afirmar que o Sensor de Fluxo de Pó apresenta curva não-linear do sinal de medição, ao longo da faixa já mencionada. Neste sentido, sua sensibilidade reduz à medida que a taxa de alimentação aumenta. Já com relação a aspectos dinâmicos, é possível declarar que o desempenho do sensor se mostrou relativamente lento. Nesta perspectiva, embora o sensor não indique valores absolutos quando a taxa de alimentação varia bruscamente em períodos inferiores a 5 s, oscilações de 1,5 s mostram-se capazes de modificar seu comportamento típico, ainda podendo indicar anomalias na alimentação de pó durante o processo;

- No que tange a interferências relativas ao arco elétrico, a condições de instalação e aos parâmetros de processo, não foram detectados efeitos preocupantes. Ainda assim, neste contexto, merecem destaque as influências da vazão do gás de arraste e de movimentos oscilatórios sobre o sinal de medição. No caso do gás de arraste, taxas de alimentação muito próximas a zero podem representar valores ligeiramente maiores, se expostas a aumento abrupto da vazão do gás de transporte. Já no que tange às influências do movimento oscilatório, a agitação provocada no sensor interfere, de forma branda, no sinal de tensão gerado. Para evitar tal interferência, o sensor não deve ser instalado próximo à tocha PTA-P, principalmente, quando é utilizado movimento de tecimento para produção de revestimentos por soldagem;
- Por fim, no que se refere a interferências, produzidas pelo próprio sensor sobre a qualidade do fluxo de partículas, concluiu-se que há influências, contudo, benéficas. Os benefícios consistem em atenuação de variações instantâneas na densidade de fluxo de pó, tendendo a manter a taxa de alimentação constante perante perturbações provocadas, por seu turno, pelo sistema de alimentação.

7.2 CONCLUSÕES SOBRE OS ADP'S

Em relação às investigações científicas sobre os ADP's, empreendidas na realização desta tese de doutorado, é seguro afirmar que renderam importantes informações. Detalhes essenciais para aprimoramentos nos projetos mecânicos dos alimentadores foram descobertos entre os resultados obtidos. Também requisitos essenciais para acionamento eletroeletrônico foram revelados. Além disto, impactos intrínsecos da natureza dos consumíveis de solda sobre a taxa de alimentação foram observados. No tocante aos alimentadores de pó, conclusões mais específicas são descritas na sequência.

- A determinação da taxa de alimentação de pó, em função da rotação, revelou fenômenos particulares de cada ADP. No que tange ao ADP de Tambor fornece, consideravelmente, melhor qualidade de dosagem e de fluxo de pó, em relação ao ADP de Esteira (considerando operação com pós tradicionais). Contudo, em virtude da imantação de pós ferromagnéticos no interior do ADP de Tambor (provocada pelo ímã presente em seu motor), é recomendado não utilizar peças magnetizáveis. Tal medida pode melhorar a operacionalidade do ADP de Tambor perante esta classe de consumíveis, fornecendo alimentação de pós ferromagnéticos também com qualidade. Em contrapartida, o ADP de Esteira, por apresentar qualidade de dosagem e fluxo de partículas inferiores, pode ser reservado para alimentação de pós alternativos, ou de consumíveis ferromagnéticos, uma vez estes não promoverem magnetização de partículas;
- Durante descarregamento do reservatório, em ambos ADP's, foram observadas flutuações da taxa de alimentação (em termos médios e instantâneos). Com relação às variações das taxas médias, essencialmente aquelas ocorrentes durante início e fim de consumo de material, não podem ser totalmente corrigidas, visto que decorrem da acomodação do material durante escoamento. Por outro lado, as oscilações dos valores instantâneos, provocadas, primordialmente, pelas imperfeições dos mecanismos de

dosagem podem, por sua vez, gerar entraves em operações de soldagem PTA-P mais avançadas. Excentricidade e cambagem do Tambor, assim como excentricidade das polias e incompatibilidade de engrenamento entre estas e a Esteira, podem ser corrigidas em novos projetos de ADP's. Assim, maior qualidade na fabricação de tais equipamentos, podem fornecer melhor performance de alimentação;

- No que tange às vibrações emitidas pelo motor dos alimentadores, é possível afirmar que exercem influências nocivas sobre ambos ADP's. Como principal efeito, a taxa de alimentação tende a ser amplificada de maneira descontrolada, por conta da agitação do pó durante dosagem. No caso específico do ADP de Tambor, frequências ressonantes agravam os efeitos das vibrações. Já com relação ao ADP de Esteira, as vibrações também provocam inundação do mecanismo de dosagem com pó, reduzindo a eficiência do dispositivo. Em ambos alimentadores, a presença de vibrações torna quase impossível regulagem e controle de um parâmetro de alimentação adequado ao processo. Sendo assim, o acionamento apropriado dos ADP's fica dependente de dispositivos de alta tecnologia, capazes de fornecer recursos para suavização das vibrações do motor;
- Quanto à vazão do gás de arraste, deve-se tomar cuidado somente quando usado o ADP de Esteira. Em torno dos níveis mais altos possíveis de vazão, a taxa de alimentação pode ser aumentada, mesmo mantendo-se fixos os parâmetros de acionamento deste alimentador. Tal efeito pode provocar dificuldades de repetição de resultados em soldagem PTA-P, em aplicações mais sensíveis;
- Já em relação à qualidade de transporte pneumático, foi possível observar que ambos ADP's apresentaram tênues variações na densidade do fluxo de partículas, operando com pós tradicionais. Tais flutuações, mais brandas no caso do ADP de Tambor, são atribuídas, primordialmente, a reflexos das oscilações da taxa de alimentação, provocadas, por seu turno, pelas imperfeições de seus mecanismos de dosagem. Contudo, em operação com

material alternativo, o ADP de Esteira forneceu fluxo de partículas mais irregular, influenciado também, neste caso, pela baixa escoabilidade do pó manipulado;

Por fim, no que se refere a resultados de soldagem, as soldas tenderam a refletir a qualidade de alimentação de pó. No caso do ADP de Tambor, este produziu revestimentos de alta qualidades usando pós tradicionais. Com mesma parametrização e mesmo tipo de material, o ADP de Esteira também foi capaz de proporcionar recobrimento de qualidade similar, mesmo fornecendo fluxo ligeiramente mais variável. Já com consumível alternativo, o ADP de Esteira proporcionou a produção de revestimento, contudo, defeituoso. Neste caso, os defeitos são atribuídos a fluxo de alimentação perturbado, consequente de escoabilidade irregular do material utilizado.

7.3 CONCLUSÕES SOBRE A VÁLVULA DE CONTROLE DINÂMICO

De acordo com os resultados alcançados neste trabalho, é possível afirmar que a válvula desenvolvida não conferiu performance satisfatória em desvio de fluxo contínuo. Neste sentido, não favorece mistura de materiais durante o processo de soldagem. Além disto, também não apresentou desempenho favorável à produção de soldas compostas por diferentes materiais, como, por exemplo, fabricação de estruturas compósitas por manufatura aditiva e confecção de revestimentos multimaterial. Por outro lado, embora de maneira mais limitada, tal atuador ainda demonstra potencial para manter melhores condições de balanceamento entre taxa de alimentação e intensidade da fonte calorífica. De forma mais específica, no que tange a Válvula de Controle Dinâmico de Fluxo de Pó, pode-se considerar os seguintes fatos.

 A respeito da performance em desvio contínuo de fluxo de pó, foi possível constatar que a Válvula de Controle Dinâmico fornece desvio proporcional do fluxo, contudo, de forma não linear. Tal característica dificulta a resolução de regulagem de fluxo. Esta afirmação fundamenta-se no fato de que, para um mesmo incremento no acionamento da válvula, o desvio pode ser imperceptível ou demasiado, dependendo da proporção desejada. No entanto, ainda é necessário considerar que ambas vias de saída de pó apresentaram vazamentos. Originados por folgas e excentricidade do mecanismo do dispositivo, se manifestam em forma de jato de baixa densidade, mesmo quando a via é completamente obstruída. Os vazamentos comprometem o uso da válvula em outras estratégias processuais. Neste sentido, não favorece o uso sequencial de materiais diferentes, uma vez que não garante estanqueidade da via interrompida. Também não assegura pleno controle de proporção em mistura de dois fluxos simultâneos, essencialmente, em condições onde um deles deve ser mantido em níveis mínimos;

- No que concerne às condições de instalação, a válvula apresentou performance semelhante, tanto operando em posição horizontal, como vertical (fixada próxima à tocha de soldagem PTA-P). Contudo, os problemas de nãoproporcionalidade do fluxo em função do acionamento da válvula, bem como os vazamentos mencionados anteriormente, se manifestaram de maneira mais pronunciada quando a válvula opera na posição horizontal;
- Finalmente, é seguro afirmar que o dispositivo pode fornecer sincronismo da taxa de alimentação, mesmo em frequências de corrente pulsada mais elevadas. Tal afirmação se baseia no fato de que a Válvula de Controle Dinâmico foi capaz de funcionar em 5 Hz, limite de frequência de pulsação de corrente permitida pela fonte de soldagem utilizada. Como principal vantagem, este recurso pode reduzir perdas de material de adição, aumentando a eficiência do processo PTA-P com corrente pulsada. Para esta aplicação, os vazamentos não chegam a comprometer as funções de controle dinâmico de fluxo de consumível, visto não ser usual configurar corrente pulsada em patamares próximos a zero.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O conteúdo científico e tecnológico gerado nesta tese de doutorado envolve uma série de revelações, essencialmente, no que tange ao desempenho operacional de cada um dos dispositivos estudados. Ainda assim, em todos os aspectos, foram conduzidos, somente, até o ponto de satisfação dos objetivos. Quanto a sequência dos trabalhos, entretanto, não deve se direcionar somente ao desenvolvimento dos protótipos, mas, também, a tópicos processuais aos quais estes podem favorecer, já no estado em que se encontram. Levando em consideração os horizontes mencionados, as seções subsequentes tratam, separadamente, de propostas para continuidade dos trabalhos, envolvendo cada um dos componentes estudados.

8.1 PROPOSTAS RELATIVAS AO SENSOR DE FLUXO DE PÓ

- Investigar influências de propriedades morfológicas, granulométricas e tipo de material (natureza química) dos consumíveis sobre o sinal de medição. Embora um fabricante afirme que o sensor centrífugo meça fluxo mássico, com baixa influência das características dos particulados, tais experiências podem confirmar tais afirmativas. Semelhantes comprovações podem determinar se o sensor deve ser calibrado para diferentes consumíveis ou não;
- Dimensionar sensor com capacidade de atuar sobre maior faixa de fluxo de materiais de adição. Adaptação do princípio adotado para medir taxas de alimentação de até 5,0 kg/h pode torna-lo capaz de atender um número muito maior de operações de soldagem, tornando-o mais útil às aplicações industriais e científicas do processo PTA-P.

8.2 PROPOSTAS RELATIVAS AOS ALIMENTADORES DE PÓ

 Em virtude das novas possibilidades, proporcionadas pelo ADP de Esteira em relação à operação com pós de diferentes faixas de distribuição granulométricas, é possível levantamento de relação entre energia de soldagem e faixa granulométrica. A partir disto, pode ser possível readequar amplitudes e valores médios de partículas à diferentes níveis de corrente de soldagem.

 Após correção das imperfeições do mecanismo de dosagem do ADP de Tambor, tal alimentador pode ser utilizado para explorações acerca de outras aplicações do PTA-P. Suas potencialidades, relativas à alta qualidade de alimentação, podem proporcionar alto desempenho do referido processo perante operações de soldagem mais avançadas, como Manufatura Aditiva e fabricação de estruturas compósitas.

8.3 PROPOSTAS RELATIVAS A VÁLVULA DE CONTROLE DINÂMICO

 Realizar atividades de soldagem PTA-P com corrente pulsada, usando a Válvula de Controle Dinâmico de Fluxo de Pó. Com isto será possível levantar as verdadeiras potencialidades do referido atuador, em favor de melhor balanceamento entre quantidade de material de adição e corrente de soldagem. A partir disto é possível caracterizar o verdadeiro potencial de tal atuador, na contribuição de benefícios sobre eficiência de deposição do processo PTA-P.

REFERÊNCIAS

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

[2] DEUIS, R. L.; YELLUP, J. M.; SUBRAMANIAN, C. **Metal-Matrix Composite Coatings by PTA Surfacing**. Composites Science and Technology, v. 58, p. 299-309, 1998.

[3] 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.

[4] DÍAZ, V. M. V. Inovação do Equipamento e Avaliação do Processo Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó (PTA-P) para Soldagem Fora de Posição. 2005. 198 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

[5] CARDOZO, E. P.; RIOS, S.; GANGULY, S.; D'OLIVEIRA, A. S. C. M. Assessment of the Effect of Different Forms of Inconel 625 Alloy Feedstock in Plasma Transfer Arc (PTA) Additive Manufacturing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 98, p. 1695-1705, 2018.

[6] HOEFER, K.; NITSCHE, A.; ABSTOSS, K. G.; ERTUGRUL, G.; HAELSIG, A.; MAYR, P. Multi-Material Additive Manufacturing by 3D Plasma Metal Deposition for Graded Structures of Super Duplex Alloy 1.4410 and the Austenitic Corrosion Resistant Alloy 1.4404. JOM, v. 71, p. 1554-1559, 2019.

[7] BRUNETTI, C.; MENDES, F. H.; PINTAUDE, G.; D'OLIVEIRA, A. S. C. M. **Analysis of Ni-Al Coatings In-Situ Processed by Plasma Transferred Arc**. International Thermal Spray Conference, v. 1, 2011.

[8] BENEGRA, M. **Desenvolvimento "In-Situ" de Aluminetos de Níquel por Plasma por Arco Transferido Resistentes à Oxidação**. 2010. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

[9] ALVES, J. A. **Desenvolvimento de um Sistema de Alimentação de Consumíveis em Pó para Soldagem PTA-P com Capacidade para Manipulação e Transporte em Oposição à Gravidade**. 2011. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. [10] ALVES, Jônathas Alexandre; SILVA, Régis Henrique Gonçalves e; DUTRA, Jair Carlos. **Development of a Powder-feed Device and Procedures for the Application of an Experimental Alloy in Overhead PTA-P Welding**. Revista Soldagem e Inspeção, v. 20, p. 412-422, 2015.

[11] ALVES, J. A. Desenvolvimento de um Dispositivo Alimentador de Pó (ADP) para Soldagem PTA-P com Capacidade de Manipulação de Materiais Não Convencionais. 2018. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso - DAMM, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis.

[12] van DIJK, J. W. **Intership at LABSOLDA**. Relatório de Estágio (em inglês). Florianópolis, ago. 2009.

[13] MELO, L. de. **Powder Jet Particle Density Distribution Analysis and Qualification for the LASER Metal Deposition Process**. 2015. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

[14] **Centrifugal Feeder for Bulk Materials**. Disponível em: https://www.directindustry.com. Acesso em jul. 2017.

[15] DICKLER, H.; THARMAKULASINGAM, S. **Powder on Demand: Rapid-Powder-Switch Enhances Economic Efficiency in LASER Metal Deposition and Paves the Way for New Processing Strategies**. LASER Technik Journal, v. 5, p. 15-17, 2017.

[16] KABATNIK, L. **Plasma-Pulver-Schwei en Verschlei beständiger Schichten auf Aluminiumwerkstoffe**. 2002. 128 f. Tese (Doutorado em Engenharia) -Rheinisch-Westfälisch Technisch Technisch Hochschule Aachen.

[17] Kognitionsorientierter Modularer und Autonomer Service-Roboter zur vor Ort Instandsetzung von Tiefzieh- und Spritzgusswerkzeugen in Wechselnden Kontexten (KomoRob). Relatório Final de Projeto.

[18] PTA Welding Systems. ISOTEC, 24 p., set. 2001.

[19] RAGHU, D.; WEBBER, R. **PTA Proves its Worth in High-Volume Hardfacing Jobs**. Welding Journal, v. 75, n. 2, p. 34-40. Miami, fev. 1996.

[20] GEBERT, A. et al. **Plasma-Pulver-Auftragschweissen**. Oberflächentechnik, n.1, p. 56-60. München, 1996.

[21] 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.

[22] 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.

[23] PAVLENKO, A. Neue Kentnisse über Phylikalische Grundlagen des Plasma Pulver-Auftragschwei_ens als Basis für die Proze_steuerung. 1996. 118 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Rheinisch-Westfälisch Technisch Technisch Hochschule, Aachen.

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

[25] MARCONI, M. I Riporti Duri con Polveri Saldate con il Processo P.T.A. (Plasma ad Arco Transferito). Livro Online (www.plasmateam.com), 320 p. 2002.

[26] 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.

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

[28] PRESCOTT, J.K.; BARNUM, R. A. **On Powder Flowability**. Pharmaceutical Technology, p. 60-84. Out.2000.

[29] SCHULZE, D. **Powders and Bulk Solids – Characterization, Storage and Flow.** Berlin Heidelberg, New York: Springer, 2008. p. 461.

[30] MARINELLI, J.; CARLSON, J. W. **Solve Solids Flow Problems in Bins, Hoopers and Feeders**. Article - American Institute of chemical Engineers, 1992. p. 10.

[31] **Powder Technology Handbook**. 3rd ed. Florida: Taylor & Francis Group, 2006. p. 855.

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

[33] SILVEIRA, C. A.; ALVES, J. A.; WEINGAERTNER, W. L.; PEREIRA, M.; SILVA, R. H. G. Caracterização Operacional de um Sistema de Alimentação de Pó Tipo Disco Horizontal. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação 9° COBEF. Joinville, 2017.

[34] 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.

[35] DECHSIRI, C. **Particle Transport in Fluidized Beds**. 2004. 177 f. Tese (Doutorado) – Universidade de Groningen.

[36] 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.

[37] BARRA, S. R. Influência do Processo MIG/MAG Térmico sobre as Propriedades Microestruturais e Mecânicas da Zona Fundida. 2003. 209 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

[38] **Motores de Corrente Contínua: Guia Rápido para uma Especificação Precisa**. 2006. 36 f. Apostila. Unidade de Automação e Controle – Acionamentos e Motores Elétricos – Siemens Ltda.

[39] **Funcionamento Motor CC**. Disponível em: https://www.citisystems.com.br. Acesso em mar. 2017.

[40] **Tecnologia Eletromecânica**. 2003. 56 f. Apostila 1600.231.01 BR. Setor de Automação e Controle – Parker Hannifin Ind. Com. Ltda.

[41] **How a Stepper Motor Works**. Disponível em: https://www.howtomechatronics.com. Acesso em ago. 2018.

[42] **Guia de Configuração do Driver STR4/8.** Disponível em: https://www.appliedmotion.com. Acesso em jul. 2018.

[43] **Manual Motor CC RF-300CA**. Disponível em: https://www.Datasheetspdf.com. Acesso em jun. 2019.

[44] **PM-10 Powder Feeder**. Disponível em: https://www.plasmamaster.com.ua. Acesso em nov. 2015.

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

[46] **Manual Motor de Passo M42SP-13NK**. Disponível em: https://www.mitsumi.co.jp. Acesso em mai. 2018.

[47] **Fonte de Alimentação FA-3005**. Disponível em: https://www.instrutherm.net.br. Acesso em fev. 2018.

[48] **Guia de Configuração do Driver STR2.** Disponível em: https://www.appliedmotion.com. Acesso em jul. 2018.

[49] **Datasheet Arduino Uno.** Disponível em: https://store.arduino.cc. Acesso em abr. 2019.

[50] **Dados Técnicos do ADP Tambor Dosador**. Disponível em: http://www.sps-soldagem.com.br. Acesso em mai. 2019.

[51] **Características do Tartílope V2**. Disponível em: http://www.spssoldagem.com.br. Acesso em abr. 2019.

[52] **Dados Técnicos da Tocha PTS3**. Disponível em: http://www.spssoldagem.com.br. Acesso em out. 2019.

[53] **Módulo Refrigerador MA-083**. Disponível em: http://www.marconi.com.br. Acesso em mar. 2015.

[54] **Manual Fonte DigiPlus A7**. Disponível em: www.imc-soldagem.com.br. Acesso em out. 2018.

[55] **Válvula de Controle Mássico de Gás GFCS-010212**. Disponível em: http://www.aalborg.com. Acesso em nov. 2016.

[56] MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, C. G. **Estatística Aplicada e probabilidade para Engenheiros.** 476 f. 4^a Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

[57] **Manual Balança de Precisão Mark S3201**. Disponível em: http://www.belequipamentos.com.br. Acesso em ago. 2015.

[58] FAHLENBOCK, T. D.; WELSCH, R. **Bulk Solids Flow Meter and Additive Feeders in PE and PP Plants**. Conferência da MBS. Zurich, 2005.

[59] ADLER, A. Flow Properties of Metal Powders. Int. J. Powder Metall, v. 5, p. 7-20, 1969.

[60] J. HAERTLEIN AND J.F. SACHSE. **The Flow Rate of Metal Powders**. Handbook of Metal Powders, Reinhold, I966.

[61] KURZ, H.P. & MINZ, G. **The Influence of Particle Size Distribution on the Flow Properties of Limestone Powders**. Powder Technology, v. 11, p. 37–40, 1975.

[62] JENIKE, A.W., JOHANSON, J.R. & CARSON, J.W. **Bin Loads – Parts 2, 3 and 4: Concepts, Mass Flow Bins, Funnel Flow Bins**. ASME, v. 95, p. 1–5, p. 6–12, p. 13–16, 1973.

[63] STANLEY-WOOD, N.G.; SARRAFI, M.; MAVERE, Z.; SCHAEFER, M. **The Relationships Between Powder Flowability, Particle-Arrangements, Bulk Densities and Jenike Failure Properties**. Advanced Powder Technology, v. 4, p. 33–40, 1993.