

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUACAO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**INOVAÇÕES EM EQUIPAMENTOS E EM
PARAMETRIZAÇÃO NO PROCESSO DE
REVESTIMENTO POR PLASMA-PÓ (PTA-P)**

**TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

RÉGIS HENRIQUE GONÇALVES E SILVA

FLORIANÓPOLIS, AGOSTO DE 2010

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

RÉGIS HENRIQUE GONÇALVES E SILVA

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de

**DOUTOR EM ENGENHARIA
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA**

sendo aprovada em sua forma final.

Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng.
Orientador

Prof. Eduardo Alberto Fancello, D.Sc.
Coordenador do curso

BANCA EXAMINADORA

Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng.
Presidente

Prof. Américo Scotti, Ph.D.
Relator

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

Prof. Augusto José de Almeida Buschinelli, Dr. Ing.
Membro

Prof. Carlos Eduardo Iconomos Baixo, Dr. Eng.
Membro

Aos meus pais, Icléa e Leonil,
Aos meus irmãos, Heber (in memoriam) e Renê

AGRADECIMENTOS

Agradeço sinceramente às pessoas que colaboraram, em diferentes contextos, na realização deste trabalho, em especial:

- ao Prof. Dr. Eng. Jair Carlos Dutra, orientador, pela convivência profissional e por todo o conhecimento e experiência transmitidos e pela infra-estrutura disponibilizada;
- ao Dr. Eng. Raul Gohr Jr, pelo apoio fundamental na bancada de ensaios;
- aos Engs. Guilherme Locatelli, Mateus Barancelli, Reinaldo Fayal, aos Tecnólogos Jônathas Alves e Ricardo Campagnin, ao Físico Thiago Cunha, ao Soldador Cleber Guedes e ao Técnico Evandro Martins, pela convivência profissional e atuação técnica direta no trabalho;
- à Márcia Paula Thiel, secretária do LABSOLDA e ao Designer Marcelo Okuyama, pelo apoio administrativo e na confecção deste trabalho;
- aos estagiários Ezequiel Gonçalves, Hellington Direne, Fernando Cechinel, João Facco, Diogo Pfeifer, Leonardo Brügemann, pela atuação direta neste trabalho;
- ao Eng. Fernando Ribas, da TRACTEBEL ENERGIA, por todo o suporte e críticas construtivas aos desenvolvimentos;
- a toda a equipe de engenheiros, tecnólogos, técnicos, estagiários e pessoal de apoio do LABSOLDA, pelo suporte em questões mecânicas, computacionais, eletrônicas, gráficas, administrativas e organizacionais, que muito contribui nas várias etapas do trabalho;
- à Raphaëlle Loehr, pela paciência, apoio e incentivo;
- à ANP, PRH-09 MECPETRO, CNPq, LABSOLDA e TRACTEBEL ENERGIA, pelo suporte ao trabalho em forma de bolsas de estudo, taxa de bancada e financiamento de projeto de Pesquisa e Desenvolvimento.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xxiii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOGIAS	xxviii
RESUMO	xxxii
ABSTRACT	xxxiv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações do Setor de Geração de Energia	4
1.2. Considerações do Setor de Petróleo e Gás	5
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E ESTADO DA ARTE	7
2.1. Breve histórico do processo PTA-P	7
2.2. Vantagens do PTA-P	8
2.2.1. Comparações diretas com outros processos	14
2.3. Aplicações do PTA-P	18
2.4. Componentes de um sistema PTA-P	22
2.4.1. Tocha	24
2.4.2. Alimentador de Pó (ADP)	35
2.4.2.1. Fluidização	44
2.5. Comportamento Térmico e Cinemático do Pó	46
2.6. Diluição	57
2.7. PTA-P Combinado – Arco não Transferido em Alta Corrente	59
2.8. Variantes do PTA-P	64
2.8.1. Processo Híbrido Laser/PTA-P	66
2.9. PTA-P Pulsado	71
2.10. Soldagem PTA-P em posições forçadas (fora da plana)	76
2.11. Parâmetros	78
2.11.1. Parâmetros elétricos	79
2.11.2. Vazões dos gases do processo	83
2.11.3. Alimentação de material	85
2.11.4. Parâmetros geométricos e dinâmicos (tecimento)	86
2.11.5. Substrato	91
2.12. Ligas metálicas em pó	92
2.12.1. Granulometria	92
2.12.2. Densidade	94
2.12.3. Processos de fabricação e morfologia	94
2.12.4. Armazenamento e secagem	97
2.12.5. Custo	97
2.12.6. Composição química	98
2.12.7. Escoabilidade	99

2.13.	Gases do processo PTA-P	100
3.	OBJETIVOS E METAS	104
4.	EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E MÉTODOS	107
4.1.	Equipamentos.....	107
4.1.1.	Fontes de Energia.....	107
4.1.2.	Tochas de Soldagem.....	108
4.1.3.	Alimentadores de Pó	109
4.1.4.	Acessórios	110
4.1.5.	Software de Controle do Processo.....	112
4.1.6.	Instrumentação	113
4.2.	Materiais	115
4.2.1.	Material de Aporte e Substrato.....	115
4.2.2.	Gases	115
4.3.	Ensaio.....	116
4.3.1.	Ensaio de soldagem	116
4.3.2.	Calibração do ADP aos pós metálicos utilizados e medição da escoabilidade	118
4.3.3.	Verificação da morfologia das partículas.....	119
4.3.4.	Determinação de características geométricas e diluição do cordão depositado	119
4.3.5.	Análise da composição química e microestrutura na seção transversal do cordão de solda	120
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	121
5.1.	Alimentador de Pó	121
5.1.1.	Transporte do material com regularidade em soldagem fora de posição: Fluidização vs. Estrangulamento (Efeito Venturi)	133
5.2.	Pulsção de Pó	137
5.3.	Medição da Vazão de Pó.....	144
5.4.	Tocha	150
5.4.1.	Características de injeção de pó	150
5.4.2.	Resultados em soldagem	155
5.4.2.1.	Taxa de deposição	155
5.4.2.2.	Diluição e Geometria do Cordão.....	164
5.4.2.3.	Soldagem de pós de diferentes morfologias.....	168
5.4.2.4.	Resultados comparativos.....	170
5.4.2.5.	Melhorias conceitualizadas	171
5.5.	Parâmetros e modos de soldagem	174
5.5.1.	Soldagem Pulsada	174

5.5.1.1.	Comparações de soldagem em corrente constante e pulsada, em correntes médias similares à constante	174
5.5.1.2.	Comportamento da taxa de deposição e características geométricas da solda para soldagem pulsada e constante, nas correntes de pulso e base.....	177
5.5.2.	Tecimento	180
5.5.3.	Distância entre o bico constritor e a peça (DBP).....	184
5.6.	Concentração de energia	187
5.7.	Soldagem PTA-P em posições forçadas (fora da plana)	198
5.8.	PTA-P Combinado - Arco não Transferido em Alta Corrente	210
5.8.2.	Considerações gerais a respeito do efeito da manipulação da corrente do arco piloto.....	226
5.8.3.	Comparação direta quanto à taxa de deposição: efeito da corrente do arco piloto x efeito da corrente do arco principal....	226
5.9.	Gases	227
5.9.1.	Gás de arraste	228
5.9.1.1.	Gás He	228
5.9.1.2.	Gás N ₂	230
5.9.1.3.	Gás H ₂	233
5.9.2.	Adição de H ₂ ao gás de proteção e fatores estéticos.....	236
5.9.3.	Efeito dos gases sobre a proteção da tocha.....	240
5.10.	Pós metálicos.....	244
5.10.1.	Escoabilidade	244
5.10.1.1.	Influência da granulometria sobre a escoabilidade e condições de alimentação	246
5.10.2.	Influência da granulometria sobre a solda	247
6.	CONCLUSÕES	251
6.1.	Sugestões para trabalhos futuros	256
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	258

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Concentração de energia de diferentes processos de revestimento por soldagem, em W/cm^2 [23].....	9
Figura 2.2. Comparação de temperaturas do arco para diferentes processos de soldagem a arco [33].....	11
Figura 2.3. Comparação qualitativa de desempenho entre TIG e PTA [37]	14
Figura 2.4. Linhas de concentração de Fe na interface revestimento – material de base para a) chama e b) PTA-P [39].....	16
Figura 2.5. Variação do teor de Fe a partir da linha de fusão no sentido do metal de solda [44]	16
Figura 2.6. Exemplo de aplicação na indústria naval – válvula de motor marítimo e assento de válvula [45].....	19
Figura 2.7. Exemplo de aplicação na indústria de petróleo e gás – válvula de esfera [45].....	19
Figura 2.8. Macrografia de solda de tubo de aço inoxidável austenítico, 11,0 mm de espessura, raiz Plasma <i>keyhole</i> e enchimento PTA-P [11]	21
Figura 2.9. Representação esquemática da intensidade e direção de transporte de calor em soldagem ao ar e subaquática [57].....	22
Figura 2.10. Esquema de um equipamento para soldagem PTA-P no modo automático.....	23
Figura 2.11. Efeito do ângulo dos canais de injeção de pó em relação ao bico constritor [9]	26
Figura 2.12. Orifícios injetores longitudinais ao deslocamento da pistola [9]	28
Figura 2.13. Tocha Plasma para soldas submarinas molhadas (versão para alimentação de arame) (partes fundamentais: 12 - câmara de exclusão; 18 - mola de compressão; 24 - anel de vedação; 26 - malha metálica [64]	29
Figura 2.14. Bico constritor e canais de injeção de pó [43]	29
Figura 2.15. Tocha PTA-P com injeção interna de pó [16]	30
Figura 2.16. Trajetória das partículas (V_{p0} = velocidade das partículas no ponto de injeção) [35].....	31
Figura 2.17. Tocha PTA-P com injeção central de pó (adaptado de [22])	32
Figura 2.18. Tocha PTA-P modificada, com injeção de pó pelo gás de proteção (1- cavidade anelar de distribuição do pó; 2- canais de transporte; 3- corpo do ânodo; 4- bocal do gás de proteção; 5- tubo de	

transporte do pó e gás de proteção; 6- jato de pó; 7- poça de fusão; 8- gás de proteção; 9- eletrodo de tungstênio; 10- substrato) [66]	33
Figura 2.19. Tocha para deposição por soldagem Plasma de pseudo ligas (1- eletrodo de tungstênio; 2- bocal de arame; 3 -gás de proteção; 4- cortina de gás de proteção; 5- material de adição em arame; 6- material de adição em pó (partículas duras) [24]	34
Figura 2.20. Simulação dos fluxos dos gases, para definição de uma geometria do bocal de proteção com eficiência otimizada [15, 69]	35
Figura 2.21. ADP tipo mesa dosadora modificado em [20] (1- coleta de pó pelo disco; 2- motor para o agitador; 3-silo armazenador; 4- flange para mangueira de saída de pó; 5- disco; 6- sucção do pó; 7- motor da mesa giratória)	37
Figura 2.22. ADP tipo fuso [73] (partes fundamentais: 12- fuso transportador; 16- motor de acionamento do fuso; 19- fluxo de pó e gás de arraste; 21- gás de arraste; 23- gás de pressurização do silo)	38
Figura 2.23. Modelo em CAD do ADP desenvolvido em [9]	39
Figura 2.24. Representação esquemática das direções de irradiação do fuso e imagens do movimento das partículas rastreadas, feitas a partir de sobreposição das radiografias [76]	41
Figura 2.25. Movimento das partículas rastreadas em relação ao movimento dos filetes do fuso [76].....	41
Figura 2.26. ADP embutida no corpo da tocha PTA-P [78] (1- corpo da tocha; 2- reservatório intermediário de pó; 3- canal de queda do pó; 4- válvula de abertura/fechamento do canal de queda; 5- tubo de conexão entre o silo armazenador e o reservatório intermediário; 6- sensor de quantidade de pó; 7- acionamento da válvula 4; 8- arco PTA-P, 9- poça de fusão).....	42
Figura 2.27. ADP do tipo válvula rotativa [80].....	43
Figura 2.28. ADP com tubo interno e aberturas [60] (partes fundamentais: 3- gás de pressurização do silo; 4- orifícios de descompactação do material em pó; 7- canal de queda do pó; 9- redução de área, aumento da velocidade do gás).....	44
Figura 2.29. Diagrama de Geldart para classificação de partículas [82]	45
Figura 2.30. Regimes de fluidização, de acordo com a velocidade de injeção do fluido inferior [82]	46
Figura 2.31. Velocidade do Fluido Plasma, V_{∞} , em função da distância do eixo axial da coluna do arco [30]	47
Figura 2.32. Relação entre a velocidade do fluxo do arco, corrente de soldagem e diâmetro do orifício constritor [1].	48

Figura 2.33. Processo de aceleração de partículas de pó de diferentes densidades (Fe e B ₄ C, de menor densidade), para uma corrente de arco PTA-P de 100 A [30].....	49
Figura 2.34. Velocidade do pó de Fe com diferentes diâmetros, para uma corrente de 100A [30]	50
Figura 2.35. Processo de aceleração de partículas de pó, para diferentes diâmetros do orifício constritor (d=diâmetro do orifício constritor) [1]	50
Figura 2.36. Distribuição radial da velocidade axial do pó em diferentes correntes de soldagem, partículas de Fe com diâmetro de 100 µm [30] (à esquerda) e perfil de viscosidade calculado para soldagem plasma [101] (à direita).....	51
Figura 2.37. Tempo médio de viagem de partículas de liga à base de Fe pela região central do arco plasma [31]	52
Figura 2.38. Comportamento térmico do pó para corrente de soldagem de 200 A [31].....	53
Figura 2.39. Comportamento térmico do pó para corrente de soldagem de 100 A [31].....	53
Figura 2.40. Relação entre o calor absorvido pelo pó, diâmetro do orifício constritor e L _p (distância da partícula em relação ao ponto focal do pó) [1]	56
Figura 2.41. Cálculo da diluição pelo método das áreas [9].	58
Figura 2.42. Constrição e aporte térmico à peça dos arcos principal e piloto (corrente do arco principal = 120 A, V _{gpl} = 3,9 l/min, diâmetro do orifício constritor = 4,0 mm) [86]	60
Figura 2.43. Comparação diferencial de entalpia e temperatura média das partículas da liga metálica em pó injetadas no arco de soldagem com os processos PTA-P e PTA-P Combinado [86]	62
Figura 2.44. Evolução da temperatura do grão da liga metálica adicionada com utilização da técnica PSTA [16].....	63
Figura 2.45. Dinâmica do arco piloto (crescimento, descolamento e reignição) [12]	63
Figura 2.46. Cabeçote híbrido Laser-PTA-P [89].....	68
Figura 2.47. Comparação entre processos de soldagem [20].....	70
Figura 2.48. Posicionamento do plasma e do feixe laser [20].....	71
Figura 2.49. Diluição em função da modulação de corrente e ângulo de injeção de pó do bico constritor (corrente média: 160 A, corrente de pulso: 200 A, corrente de base: 120 A, tempo de pulso igual ao tempo de base: 0,1 s para frequência de 5 Hz e 0,2 s para frequência de 2,5 Hz)	

(Díaz [9] mediu o ângulo de injeção entre a face do bico constritor e o eixo do canal injetor) [9]	74
Figura 2.50. Bico constritor modificado, que permite regulagem independente de alimentação de material em pó para os orifícios injetores [65]	77
Figura 2.51. Soldas realizadas na posição vertical [65]	77
Figura 2.52. Montagens de bancada para ensaios de soldagem PTA-P em posições forçadas [9].....	78
Figura 2.53. Seção transversal de cordões realizados em posições forçadas [9]	78
Figura 2.54. Aporte térmico à peça em função da corrente do arco principal [16]	79
Figura 2.55. Calor dissipado sobre o bico constritor, em função da corrente do arco principal [16]	81
Figura 2.56. Influência da corrente principal sobre a potência transferida à peça (Q_p), ao bico constritor (Q_s), ao bocal focalizador (Q_f) e ao eletrodo de tungstênio (Q_c) e eficiência de aquecimento relativa de cada uma destas partes (H_p , H_s , H_f e H_c) [40].....	82
Figura 2.57. Relação entre a pressão sobre a poça e a vazão do gás de plasma em simulação por elementos finitos (Condições de simulação apresentadas: $I = 120$ A, $V_{gpl} = 0,3$ l/min, $V_{gprot} = 9,0$ l/min, $DBP = 10$ mm) [68]	83
Figura 2.58. Distribuição radial da temperatura do arco, para diferentes vazões de gás de plasma [16]	84
Figura 2.59. Diluição versus corrente do arco principal em diferentes vazões de pó e de gás de plasma [61]	86
Figura 2.60. Representação esquemática da tocha PTA-P e alguns de seus parâmetros geométricos ($ID =$ diâmetro do bico constritor) [9]87	
Figura 2.61. Regiões isotérmicas do arco, de acordo com variação da DBP ($ID =$ diâmetro do orifício constritor, $I =$ corrente do arco principal) [16]	88
Figura 2.62. Diluição sobre diferentes substratos [48]	91
Figura 2.63. Histograma de faixa granulométrica [16]	92
Figura 2.64. Processo de atomização de liga metálica [16].....	95
Figura 2.65. Tamanho de grão e morfologia dos pós metálicos [36]	96
Figura 2.66. Resistência à cavitação de diferentes ligas metálicas anti-cavitação, depositadas pelos processos MIG/MAG e PTA-P [49]	98
Figura 2.67. Influência da composição do gás de proteção sobre a pressão do arco e a densidade de corrente (Condições de simulação	

apresentadas: $I = 120$ A, $V_{gpl} = 0,3$ l/min, $V_{gprot} = 9,0$ l/min, DBP = 10 mm) [68]	101
Figura 2.68. Velocidades para Ar e He como gases de proteção no processo TIG (à esquerda: perfil de velocidades; à direita, perfil de temperaturas) [95].....	102
Figura 2.69. Modelo da tocha, perfis de velocidades e temperaturas do plasma para o processo PTA-P (condições não apresentadas) [69]	103
Figura 3.1. De cima para baixo, com níveis em diferentes padrões de cor: metas, objetivo global, justificativas (algumas justificativas se repetem em diferentes níveis, por serem conseqüências de outras)....	106
Figura 4.1. Fontes de Soldagem	108
Figura 4.2. Tochas PTA-P.....	109
Figura 4.3. ADP desenvolvido em [9] (esquerda) e alimentador de pó para PTA-P comercial (direita).....	110
Figura 4.4. Acessórios para soldagem PTA-P	112
Figura 4.5. Tela do software de controle PLC-1.....	113
Figura 4.6. Sistema de aquisição e tratamento de dados SAP, tela do OSCILOS, com medição do arco principal e do arco piloto, exemplo de exportação de dados para análise em outros softwares e características técnicas	114
Figura 4.7. Morfologia e granulometria das liga metálica em pó AISI 316 L	115
Figura 4.8. Ensaio de soldagem com determinação da massa do cordão - limitação do tempo de aquisição, isolando transitórios e chapas de sacrifício	117
Figura 4.9. Dispositivo (escoômetro) para determinação da escoabilidade em s/50g	118
Figura 4.10. Dimensões geométricas do cordão de solda abordadas no presente trabalho	119
Figura 4.11. Exemplo de uso do software de tratamento de imagens para cálculo da diluição da solda	120
Figura 4.12. Regiões de análise da composição química (MEV)	120
Figura 5.1. ADP com câmara de pulsação.....	122
Figura 5.2. Tubo de turbulência inserido na câmara de pulsação ...	123
Figura 5.3. Protótipo de câmara de suspensão por alto-falantes, esquema para equalização de pressões e aparato para controle dos alto-falantes	124
Figura 5.4. Pó 316 L atomizado em água (nota-se não esfericidade), utilizado para análise do ADP comercial.....	125
Figura 5.5. Vazão mássica de pó, ADP PM-PF-10, liga 316L atomizada em água (com linha de tendência)	126

Figura 5.6.	Morfologia da liga LO3* (mistura de pós triturados)...	126
Figura 5.7.	Partículas aderidas ao canal de queda do ADP.....	127
Figura 5.8.	Distância (em mm) alcançada pelo jato de partículas com silo do alimentador modelo PM-PF-10 fechado (à esquerda.) e aberto (à direita), sob a mesma regulagem de vazão de gás (5 l/min, Ar).....	128
Figura 5.9.	Esquema do ADP-2 com silo aberto.....	128
Figura 5.10.	Montagem do sistema para pressurização do silo armazenador do ADP-2 (detalhe do “T”, que divide o gás entre a pressurização do silo e o arraste do pó).....	129
Figura 5.11.	Verificação da geometria do cordão (vista superior) e do teor médio de oxigênio na seção transversal	129
Figura 5.12.	Silo armazenador com pequena abertura na tampa e tela protetora	130
Figura 5.13.	Modelo em CAD do ADP-2, cilindro dosador e ADP-2 montado	131
Figura 5.14.	Vazão mássica de pó, ADP-2, liga 316L em pó esférico (com linha de tendência)	133
Figura 5.15.	Princípios para suspensão e transporte do material em pó para alimentação à tocha de soldagem PTA-P	134
Figura 5.16.	Montagem para ensaios comparativos (filmagem) entre a câmara de fluidização (na foto) e o tubo de estrangulamento (efeito Venturi, não ilustrado nesta figura).....	135
Figura 5.17.	Tempo de entrada em regime para diferentes pós metálicos atomizados (esféricos) para PTA-P.....	136
Figura 5.18.	Gráfico em rede comparativo entre os ADPs investigados	136
Figura 5.19.	Válvula direcional comercial com conexões adaptadas, travada por incrustação de pó.....	138
Figura 5.20.	Pulsador de pó (uma entrada, vinda do ADP-2 e duas saídas: uma à tocha e outra de retorno ao silo do ADP-2) modelado e conjunto físico montado, com motor, redutor e respectivo driver.....	138
Figura 5.21.	Cordão obtido em soldagem PTA-P pulsada com pulsação sincronizada de alimentação de material em pó	140
Figura 5.22.	Cordão obtido em soldagem PTA-P pulsada com alimentação contínua de material em pó	142
Figura 5.23.	Sensor capacitivo testado para medição da vazão de pó metálico	145
Figura 5.24.	Diagrama esquemático da medição ativa de vazão de pó	146

Figura 5.25.	Aparato inicialmente construído para medição ativa de vazão de pó, que conta com dois tubos de cobre isolados entre si, um “eletrometro” (aparelho capaz de medir correntes da ordem de pA), uma fonte de tensão e um osciloscópio.....	146
Figura 5.26.	Comportamento do medidor de vazão de pó para PTA-P pelo método ativo (regulagem do ADP PM-PF-10, vide posição do botão vermelho, e leitura no osciloscópio)	147
Figura 5.27.	Aparato para o método passivo de medição de pó para PTA-P	148
Figura 5.28.	Comportamento do medidor de vazão de pó para PTA-P pelo método passivo (regulagem do ADP PM-PF-10, vide posição do botão vermelho, e leitura no osciloscópio)	149
Figura 5.29.	Verificação da distribuição de alimentação de pó na posição vertical de soldagem para diferentes tochas PTA-P.....	151
Figura 5.30.	Distribuição da alimentação de pó à tocha para posição de soldagem vertical. (As vazões de gás de arraste se referem ao gás de arraste do “venturi” e a vazão de gás ao alimentador ficou fixa em 2,0 l/min). À dir., representação dos tipos de tocha	152
Figura 5.31.	Distribuição da injeção de pó entre os orifícios inferiores e superiores da tocha com alimentação interna de pó (taxa de alimentação de 4,35 g/30s).....	154
Figura 5.32.	Coincidência entre o ponto focal de injeção de pó geométrico e efetivo, para a tocha com injeção externa de pó.....	155
Figura 5.33.	Massa dos cordões depositados em 1 minuto de soldagem	157
Figura 5.34.	Massa dos cordões depositados em 1 minuto de soldagem	159
Figura 5.35.	Massa dos cordões depositados em 1 minuto de soldagem, com as respectivas correntes médias medidas	162
Figura 5.36.	Tocha com injeção interna de pó e seus canais entupidos por material aderido.....	163
Figura 5.37.	Tocha com injeção interna de pó e material aderido	164
Figura 5.38.	Geometria do cordão e diluição para os diferentes modelos de tocha de soldagem PTA-P quanto ao tipo de injeção de material para uma taxa de alimentação da ordem de 9,5 g/min	165
Figura 5.39.	Geometria do cordão e diluição para os diferentes modelos de tocha de soldagem PTA-P quanto ao tipo de injeção de material para uma taxa de alimentação de 11,5 g/min	166

Figura 5.40. Comparação geométrica da seção transversal – tocha PTA-P com injeção interna x tocha PTA-P com injeção externa e respectivas correntes médias	167
Figura 5.41. Geometria do cordão e diluição para os diferentes modelos de tocha de soldagem PTA-P quanto ao tipo de injeção de material para uma taxa de alimentação de 17,5 g/min	168
Figura 5.42. Canais obstruídos por material aderido à tocha com injeção interna de pó – material: LO3* (triturado e misturado)	170
Figura 5.43. Gráfico em rede do desempenho das tochas de soldagem PTA-P com injeção interna externa de pó.....	170
Figura 5.44. Serpentina de refrigeração externa do bocal do gás de proteção (unidade de refrigeração UR 2)	172
Figura 5.45. Verificação da influência da refrigeração do bocal do gás de proteção na integridade do mesmo.....	172
Figura 5.46. Inovações no projeto da tocha PTA-P.....	173
Figura 5.47. Massa dos cordões depositados em 1 minuto de soldagem para diferentes condições de soldagem pulsada e em corrente constante, segundo a Tabela 5.15	176
Figura 5.48. Geometria do cordão e diluição para soldagem sem pulsação e com diferentes condições de pulsação, conforme procedimento da Tabela 5.15	177
Figura 5.49. Massa dos cordões depositados em 1 minuto de soldagem para diferentes condições de soldagem pulsada e em corrente constante, segundo a Tabela 5.17	178
Figura 5.50. Geometria do cordão e diluição para soldagem em modo pulsado e constante, com as correntes de pulso e de base do modo pulsado, conforme Tabela 5.17	179
Figura 5.51. Aspectos superficiais das soldas relativas à Tabela 5.17 (soldagem pulsada).....	179
Figura 5.52. Massa dos cordões depositados em 1 minuto de soldagem para diferentes condições, segundo a Tabela 5.18	181
Figura 5.53. Geometria do cordão e diluição para soldas sem tecimento e com diferentes condições de tecimento, conforme Tabela 5.18	182
Figura 5.54. Comportamento da penetração e diluição de acordo com a espessura do cordão [16]	183
Figura 5.55. Massa dos cordões depositados em 1 minuto de soldagem (Im1: cerca de 75 A; Im2: cerca de 115 A, conforme Tabela 5.20)	186

Figura 5.56.	Geometria do cordão e diluição para diferentes DBPs e uma taxa de alimentação de 11,5 g/min (Im1: cerca de 75 A; Im2: cerca de 115 A, conforme Tabela 5.20)	187
Figura 5.57.	Oscilogramas relativos as soldas da Tabela 5.21 (U1: Keyhole; U2: Keyhole + pó; U3: Keyhole ++ pó; U4: PTA-P).....	189
Figura 5.58.	Seções transversais relativas às soldas descritas na Tabela 5.21	190
Figura 5.59.	Geometria do cordão e diluição para as soldas da Tabela 5.21	190
Figura 5.60.	Massa dos cordões depositados, relativos à Tabela 5.21.	191
Figura 5.61.	Comportamento da tensão média (Um) e potência média (Pm) de soldagem para os parâmetros da Tabela 5.22	192
Figura 5.62.	Massa dos cordões depositados em um minuto de solda, relativos à Tabela 5.22.....	193
Figura 5.63.	Geometria do cordão e diluição para as soldas da Tabela 5.22 (diferentes diâmetros do orifício constritor).....	193
Figura 5.64.	Comportamento da tensão média (Um) e potência média (Pm) de soldagem para os parâmetros da Tabela 5.23, com variação do recuo do eletrodo para diferentes correntes de soldagem PTA-P	195
Figura 5.65.	Massa dos cordões depositados em um minuto de solda, relativos à Tabela 5.23, com variação do recuo do eletrodo para diferentes correntes de soldagem (Im1≈110 A; Im2≈130 A).....	196
Figura 5.66.	Geometria do cordão e diluição para as soldas da Tabela 5.23, com diferentes recuos do eletrodo (Im1≈110 A; Im2≈130 A)	197
Figura 5.67.	Bancada de soldagem preparada para ensaios de soldagem sobrecabeça a 45° (em relação à normal à posição plana) ..	198
Figura 5.68.	Comportamento da injeção de pó a 45° (sobrecabeça) (sob as condições presentes no presente trabalho).....	199
Figura 5.69.	Comportamento da injeção de pó a 90° (sobrecabeça) (sob as condições presentes no presente trabalho).....	200
Figura 5.70.	Comportamento da injeção de pó a 0° (vertical / horizontal) (sob as condições presentes no presente trabalho).....	200
Figura 5.71.	Aspectos superficiais das soldas relativas à Tabela 5.24, posição sobrecabeça a 45°, sentido descendente	202
Figura 5.72.	Montagem da bancada para soldagem vertical descendente	202

Figura 5.73. Aspectos superficiais das soldas relativas à Tabela 5.25, posição vertical descendente	203
Figura 5.74. Comportamento da tensão de soldagem nos momentos em que há escorrimento da poça (pingos)	204
Figura 5.75. Solda na posição vertical descendente com parâmetros de início de soldagem modificados e ausência de escorrimento	205
Figura 5.76. Soldas na posição vertical descendente com parâmetros de início de soldagem modificados e ausência de escorrimento, velocidade de 7,0 cm/min.....	206
Figura 5.77. Soldas na posição vertical descendente com parâmetros de início de soldagem modificados com escorrimento para os modos sem tecimento, velocidade de 5,0 cm/min.....	207
Figura 5.78. Montagem da bancada para soldagem sobrecabeça a 90° em relação à normal à peça (6 horas).....	208
Figura 5.79. Soldas na posição sobrecabeça a 90° em relação à normal à peça (6 horas) e parâmetros de início de soldagem modificados; velocidade de soldagem de 10,0 cm/min.....	209
Figura 5.80. Aspectos geométricos das soldas nas posições vertical descendente, sobrecabeça a 45° (sobrecabeça 1) e sobrecabeça a 90° (6 horas) (sobrecabeça 2).....	210
Figura 5.81. Variação da tensão e potência médias do arco principal em consequência da variação na corrente do arco piloto, conforme Tabela 5.30	212
Figura 5.82. Massa do cordão depositado em 1 minuto de soldagem, sob diferentes correntes do arco piloto e corrente do arco principal fixa (parâmetros de soldagem da Tabela 5.30).....	212
Figura 5.83. Aspectos geométricos das soldas sob diferentes correntes do arco piloto conforme Tabela 5.30.....	213
Figura 5.84. Variação da tensão e potência médias do arco principal em consequência da variação na corrente do arco piloto, conforme Tabela 5.31	214
Figura 5.85. Massa do cordão depositado em 1 minuto de soldagem, sob diferentes correntes do arco piloto e corrente do arco principal fixa (parâmetros de soldagem da Tabela 5.31).....	215
Figura 5.86. Aspectos geométricos das soldas sob diferentes correntes do arco piloto conforme Tabela 5.31	216
Figura 5.87. Variação da tensão e potência médias do arco principal em consequência da variação na corrente do arco piloto, conforme Tabela 5.32	218

Figura 5.88.	Comportamento da tensão do arco piloto, com variação em sua corrente, na ausência e na presença do arco principal (parâmetros de soldagem da Tabela 5.32).....	218
Figura 5.89.	Massa do cordão depositado em 1 minuto de soldagem, sob diferentes correntes do arco piloto e corrente do arco principal fixa (parâmetros de soldagem da Tabela 5.32).....	219
Figura 5.90.	Aspectos geométricos das soldas sob diferentes correntes do arco piloto conforme Tabela 5.32.....	220
Figura 5.91.	Variação da tensão e potência médias do arco principal em consequência da variação na corrente do arco piloto, conforme Tabela 5.33	221
Figura 5.92.	Massa do cordão depositado em 1 minuto de soldagem, sob diferentes correntes do arco piloto e corrente do arco principal fixa (parâmetros de soldagem da Tabela 5.33).....	222
Figura 5.93.	Aspectos geométricos das soldas sob diferentes correntes do arco piloto conforme Tabela 5.33.....	223
Figura 5.94.	Variação da tensão e potência médias do arco principal em consequência da variação na corrente do arco piloto, conforme Tabela 5.34	224
Figura 5.95.	Massa do cordão depositado em 1 minuto de soldagem, sob diferentes correntes do arco piloto e corrente do arco principal fixa (parâmetros de soldagem da Tabela 5.34).....	225
Figura 5.96.	Aspectos geométricos das soldas sob diferentes correntes do arco piloto conforme Tabela 5.34.....	225
Figura 5.97.	Massa do cordão depositado em 1 minuto de soldagem, para comparação do efeito das correntes do arco principal e do arco piloto, isoladamente	227
Figura 5.98.	Variação da tensão e potência médias do arco principal em consequência da variação na composição do gás de arraste, conforme Tabela 5.35	229
Figura 5.99.	Massa do cordão depositado em 1 minuto de soldagem, verificação do efeito do gás He no gás de arraste (soldas relativas à Tabela 5.35)	230
Figura 5.100.	Aspectos geométricos das soldas sob diferentes composições do gás de arraste, conforme Tabela 5.35	230
Figura 5.101.	Variação da tensão e potência médias do arco principal em consequência da variação na composição do gás de arraste, conforme Tabela 5.36	232

Figura 5.102. Aspectos geométricos das soldas sob diferentes composições do gás de arraste, conforme Tabela 5.36 (ordem dos cordões, da esquerda para a direita: Ar+20% N ₂ , Ar+5% N ₂ , Ar+10% N ₂ , Ar+50% N ₂)	232
Figura 5.103. Aspectos geométricos da solda com adição de 5% de N ₂ ao gás de arraste, conforme Tabela 5.36	233
Figura 5.104. Contaminação da tocha por respingos oriundos da turbulência da poça metálica sob altos teores de N ₂ no gás de arraste	233
Figura 5.105. Variação da tensão e potência médias do arco principal em consequência da variação na composição do gás de arraste, conforme Tabela 5.37	234
Figura 5.106. Massa do cordão depositado em 1 minuto de soldagem, verificação do efeito do gás H ₂ no gás de arraste (soldas relativas à Tabela 5.37)	235
Figura 5.107. Aspectos geométricos das soldas sob diferentes composições do gás de arraste, conforme Tabela 5.37	236
Figura 5.108. Variação da tensão e potência médias do arco principal em consequência da variação na composição do gás de arraste, conforme Tabela 5.38	237
Figura 5.109. Massa do cordão depositado em 1 minuto de soldagem, verificação do efeito do gás H ₂ no gás de proteção (soldas relativas à Tabela 5.38)	238
Figura 5.110. Aspectos geométricos das soldas sob diferentes composições do gás de proteção, conforme Tabela 5.38	238
Figura 5.111. Aspectos superficiais das soldas, com diferentes teores de H ₂ no gás de arraste e gás de proteção	239
Figura 5.112. Variação da tensão e potência médias do arco principal em consequência da variação na composição do gás de arraste e do gás de proteção, conforme Tabela 5.39	242
Figura 5.113. Situação da tocha em relação a material aderido, oriundo de turbulência na poça metálica (respingos), para as diferentes combinações de gases de proteção e de plasma, para composição fixa do gás de arraste em 95%Ar+5%N ₂	243
Figura 5.114. Aspecto superficial dos cordões realizados com a combinação 3 (à esquerda) e 2 (à direita) dos gases de proteção de plasma, conforme a Tabela 5.39	244
Figura 5.115. Material metálico (FeCrMnNi-Cogne) em pó para PTA-P utilizado em ensaios de escoabilidade	245

Figura 5.116. Aspecto superficial e macrografia das seções transversais de cordões de solda depositados por PTA-P e pós de mesma composição química (AISI 316L), morfologia esférica e granulometrias diferentes 249

Figura 5.117. Aspectos geométricos das soldas sob diferentes correntes do arco piloto conforme Tabela 5.42..... 250

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1.	Fontes de calor e respectivas densidades de potência.....	10
Tabela 2.2.	Eficiência térmica (quociente entre potência gerada no arco e absorvida pela peça) de vários processos de revestimento por soldagem [16].....	10
Tabela 2.3.	Comparação ilustrativa da velocidade de soldagem. (Não foram fornecidos os parâmetros de comparação, fato que mantém os resultados num nível apenas informativo e genérico.) [45].....	12
Tabela 2.4.	Comparação da diluição média entre diferentes processos [29]	13
Tabela 2.5.	Distribuição de absorção da potência gerada.....	24
Tabela 2.6.	Condições de soldagem PTA assumidas em [30]......	47
Tabela 2.7.	Propriedades físicas do plasma de Ar (ρ_m = densidade, μ = viscosidade) [30].	49
Tabela 2.8.	Exemplos de parâmetros do processo híbrido Laser-PTA-P (em [20] se investigou soldagem de revestimento e nos outros exemplos, soldagem de união)	69
Tabela 2.9.	Valores de regulagem encontrados na literatura para os parâmetros da soldagem PTA-P	90
Tabela 2.10.	Conversão de unidades de granulometria de pós	93
Tabela 2.11.	Escoabilidade de pós para PTA-P ([94] faz a ressalva de que os valores podem variar de acordo com a composição química da liga)	99
Tabela 4.1.	Composição química do aço 316 L	115
Tabela 5.1.	Valores para suspensão do pó metálico para PTA-P	124
Tabela 5.2.	Vazão mássica de pó, ADP PM-PF-10, liga 316L atomizada em água.....	125
Tabela 5.3.	Desempenho do ADP-2 (IHM – interface homem / máquina)	132
Tabela 5.4.	Determinação da curva de alimentação do ADP-2.....	133
Tabela 5.5.	Parâmetros de soldagem PTA-P pulsada com pulsação sincronizada de alimentação de material em pó (parâmetros elétricos medidos via SAP).....	140
Tabela 5.6.	Parâmetros de soldagem PTA-P pulsada com alimentação contínua de material em pó (parâmetros elétricos medidos via SAP).	142
Tabela 5.7.	Taxas de alimentação (valores médios) de pó separadas entre os orifícios injetores superiores e inferiores da tocha, para uma taxa de alimentação previamente regulada em 9,20 g/30s	153
Tabela 5.8.	Parâmetros de soldagem PTA-P para verificação da influência do tipo de tocha sobre a taxa de deposição – Tocha com	

injeção externa de material em pó (parâmetros elétricos medidos via SAP)	156
Tabela 5.9. Parâmetros de soldagem PTA-P para verificação da influência do tipo de tocha sobre a taxa de deposição – Tocha com injeção interna de material em pó (parâmetros elétricos medidos via SAP)	156
Tabela 5.10. Parâmetros de soldagem PTA-P para verificação da influência do tipo de tocha sobre a diluição – Tocha com injeção externa de material em pó (parâmetros elétricos medidos via SAP)	158
Tabela 5.11. Parâmetros de soldagem PTA-P para verificação da influência do tipo de tocha sobre a taxa de deposição – Tocha com injeção interna de material em pó (parâmetros elétricos medidos via SAP)	159
Tabela 5.12. Parâmetros de soldagem PTA-P para verificação da influência do tipo de tocha sobre a taxa de deposição (sob maior taxa de alimentação) – Tocha com injeção interna de material em pó (parâmetros elétricos medidos via SAP)	161
Tabela 5.13. Parâmetros de soldagem PTA-P para verificação da influência do tipo de tocha sobre a taxa de deposição (sob maior taxa de alimentação) – Tocha com injeção externa de material em pó (parâmetros elétricos medidos via SAP)	162
Tabela 5.14. Parâmetros de soldagem PTA-P regulados para soldagem de material em pó obtido por trituração e mistura (LO3*) e tocha com injeção interna de material.....	169
Tabela 5.15. Parâmetros de soldagem PTA-P pulsada. Parâmetros dinâmicos de pulsação (frequência) similares aos de tecimento, Tabela 5.18 (parâmetros elétricos medidos via SAP).....	175
Tabela 5.16. Homogeneidade da distribuição da composição química na seção transversal do cordão de solda com pulsação	175
Tabela 5.17. Parâmetros de soldagem PTA-P pulsada e em corrente constante (parâmetros elétricos medidos via SAP).....	178
Tabela 5.18. Parâmetros de soldagem PTA-P sem e com tecimento, em duas regulagens diferentes de tecimento (parâmetros elétricos medidos via SAP)	180
Tabela 5.19. Homogeneidade da distribuição da composição química na seção transversal do cordão de solda com tecimento	181
Tabela 5.20. Parâmetros de ensaios de soldagem para verificação da influência da DBP na soldagem PTA-P (valores medidos via SAP) ..	185
Tabela 5.21. Parâmetros de ensaios de soldagem para verificações relativas ao fator concentração de energia no processo PTA-P(valores medidos via SAP)	188

Tabela 5.22. Parâmetros de ensaios de soldagem para verificações relativas ao fator concentração de energia em PTA-P (variação do diâmetro do orifício constritor) (valores medidos via SAP).....	192
Tabela 5.23. Parâmetros de ensaios de soldagem para verificações relativas ao fator concentração de energia no processo PTA-P, com variação do recuo do eletrodo (valores medidos via SAP).....	194
Tabela 5.24. Parâmetros de soldagem PTA-P testados para a posição sobrecabeça a 45° no sentido descendente (parâmetros elétricos medidos via SAP)	201
Tabela 5.25. Parâmetros de soldagem PTA-P testados para a posição vertical descendente (parâmetros elétricos medidos via SAP).....	203
Tabela 5.26. Parâmetros de soldagem PTA-P testados para a posição vertical descendente e parâmetros de início de soldagem modificados (parâmetros elétricos medidos via SAP)	205
Tabela 5.27. Parâmetros de soldagem PTA-P testados para a posição vertical descendente e parâmetros de início de soldagem modificados; velocidade de soldagem de 7,0 cm/min (parâmetros elétricos medidos via SAP)	206
Tabela 5.28. Parâmetros de soldagem PTA-P testados para a posição vertical descendente e parâmetros de início de soldagem modificados; velocidade de soldagem de 5,0 cm/min (parâmetros elétricos medidos via SAP)	207
Tabela 5.29. Parâmetros de soldagem PTA-P testados para a posição sobrecabeça a 90° em relação à normal à peça (6 horas) e parâmetros de início de soldagem modificados; velocidade de soldagem de 10,0 cm/min (parâmetros elétricos medidos via SAP)	209
Tabela 5.30. Parâmetros de soldagem PTA-P para verificação da influência da intensidade de corrente do arco piloto sobre as características da solda. Variação de regulagem apenas da corrente do arco piloto ($I_{m_{ap}}$) ($I_{m_{ap}} \approx 70$ A, $V_{mpo} = 9,8$ g/min) (parâmetros elétricos medidos via SAP).....	211
Tabela 5.31. Parâmetros de soldagem PTA-P para verificação da influência da intensidade de corrente do arco piloto sobre as características da solda. Variação de regulagem apenas da corrente do arco piloto ($I_{m_{ap}}$) ($I_{m_{ap}} \approx 110$ A, $V_{mpo} = 16,5$ g/min) (parâmetros elétricos medidos via SAP).....	214
Tabela 5.32. Parâmetros de soldagem PTA-P para verificação da influência da intensidade de corrente do arco piloto sobre as características da solda. Variação de regulagem apenas da corrente do	

arco piloto ($I_{m_{ap}}$) ($I_{m_{ap}} \approx 110$ A, $V_{mpo} = 22,0$ g/min) (parâmetros elétricos medidos via SAP)	217
Tabela 5.33. Parâmetros de soldagem PTA-P para verificação da influência da intensidade de corrente do arco piloto sobre as características da solda. Variação de regulagem apenas da corrente do arco piloto ($I_{m_{ap}}$) ($I_{m_{ap}} \approx 110$ A, $V_{mpo} = 26,0$ g/min) (parâmetros elétricos medidos via SAP)	221
Tabela 5.34. Parâmetros de soldagem PTA-P para verificação da influência da intensidade de corrente do arco piloto sobre as características da solda. Variação de regulagem apenas da corrente do arco piloto ($I_{m_{ap}}$) ($I_{m_{ap}} \approx 90$ A, $V_{mpo} = 6,8$ g/min) (parâmetros elétricos medidos via SAP)	224
Tabela 5.35. Parâmetros de ensaios de soldagem para verificação da influência do gás He no gás de arraste de pó do processo PTA-P (valores medidos via SAP)	228
Tabela 5.36. Parâmetros de ensaios de soldagem para verificação da influência do gás N_2 no gás de arraste de pó do processo PTA-P, (valores medidos via SAP).....	231
Tabela 5.37. Parâmetros de ensaios de soldagem para verificação da influência do gás H_2 no gás de arraste de pó do processo PTA-P, (valores medidos via SAP).....	234
Tabela 5.38. Parâmetros de ensaios de soldagem para verificação da influência do gás H_2 no gás de proteção do processo PTA-P, (valores medidos via SAP)	237
Tabela 5.39. Parâmetros de ensaios de soldagem para verificação da eficácia de diferentes combinações de gases de proteção e de arraste na redução da contaminação da tocha de soldagem PTA-P, (valores medidos via SAP)	241
Tabela 5.40. Escoabilidade de pós de diferentes granulometrias do aço 316 L	246
Tabela 5.41. Taxa de alimentação x rotação do cilindro dosador do ADP-2, para pós de diferentes faixas granulométricas	247
Tabela 5.42. Parâmetros de ensaios de soldagem para verificação da influência da granulometria do pó na soldagem PTA-P (valores medidos via SAP)	247
Tabela 5.43. Oxidação do metal de solda em cordões depositados por PTA-P e pós de mesma composição química (AISI 316L), morfologia esférica e granulometrias diferentes (teor de O avaliado no MEV, sujeito a erros intrínsecos. Outras análises mais confiáveis poderão ser realizadas para verificação.)	249

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOGIAS

ADP: alimentador de pó
Ai: injeção inferior de pó
Al: elemento alumínio
aprox.: aproximadamente
Ar: gás argônio
As: injeção superior de pó
At: amplitude de tecimento
AWS: American Welding Society
B: elemento boro
boe/d: barril de óleo equivalente por dia
C: elemento carbono
CA: corrente alternada
CAD: computer aided design
Co: elemento cobalto
CO₂: gás carbônico
C_R: constante de correlação da equação 2.6
Cr: elemento cromo
Cu: elemento cobre
D : diluição (%)
d: diâmetro do orifício constritor [1]
DBP: distância entre a face inferior do bico constritor e a peça
DCCP (Direct Current Combined Polarity - Corrente Contínua Polaridade Combinada)
DIN: Deutsche Institut fur Normung
d_p: diâmetro da partícula
EDS – energy dispersive x-ray spectrum [39], energy dispersive spectroscopy [48]
eq.: equação
ER: eletrodo revestido
f: frequência de tecimento
Fe: elemento ferro
H₂: gás hidrogênio
H₂O: água
Hc: eficiência de aquecimento relativa ao eletrodo de tungstênio
He: gás hélio
Hf: eficiência de aquecimento relativa ao bocal focalizador
HI = (I_G / I_p): relação de correntes [42]
Hp: eficiência de aquecimento relativa à peça

HPTA: High Power Plasma Transferred Arc
Hs: eficiência de aquecimento relativa ao bico constritor
I: corrente de soldagem
ID: diâmetro do orifício constritor [16]
 I_G : corrente de base [42]
IHM: interface homem maquina
 I_i : corrente instantânea, utilizada no cálculo de Pm
 I_m : corrente média
 I_p : corrente de pulso
J: densidade de corrente
L: largura do cordão de solda
 L_b : posição das partículas a partir da face inferior do bico constritor
 L_p : distância da partícula em relação ao ponto focal do pó
 L_{pp} : distância do ponto focal do pó até a poça
MPTA: Micro Plasma Transferred Arc
 N_2 : gás nitrogênio
NbC: carbeto de nióbio
Nd:YAG: laser do estado sólido, (cristal de ítrio e alumínio dopado com neodímio)
Ni: elemento níquel
° F: graus Fahrenheit
 \varnothing_c : diâmetro constritor
 \varnothing_e : diâmetro do eletrodo
PAW: Plasma Arc Welding
Pel: potência elétrica total fornecida a ambos os arcos (piloto e principal) [86]
Pm: potência média
Pmáx: penetração máxima
Pmt: potência média total
PPAW: Plasma Powder Arc Welding
PPW: Plasma Powder Welding
PSTA: Plasma Semi Transferred Arc
PTA-A: Plasma Transferred Arc alimentado com Arame
PTA-P: Plasma Transferred Arc alimentado com Pó
Pw: potência total, dos dois arcos (piloto e principal), aportada à peça [86]
Qc: potência transferida ao eletrodo de tungstênio
Qf: potência transferida ao bocal focalizador
Qp: potência transferida à peça
Qs: potência transferida ao bico constritor

Re: recuo do eletrodo

SAP: Sistema de Aquisição de Dados de soldagem

SAW: Submerged Arc Welding

SCC: Stress Corrosion Cracking

Si: elemento silício

SiC: carbetto de silício

T: período de pulsação

t_0 : tempo de viagem do pó ao longo do arco

t_l : tempo necessário à partícula em viagem dentro do arco para alcançar determinada temperatura

Ta: temperatura do arco

Ta: temperatura na qual a partícula chega à poça de fusão [16]

Tb: temperatura de fusão da partícula [16]

TiC: carbetto de titânio

Tp: temperatura da partícula

tp: tempo de pulso [42]

Tpi: Total de pó injetado em 1 minuto

Tpl: temperatura do plasma

Tpó: temperatura do pó

U: tensão de soldagem

Ui: tensão instantânea de soldagem, utilizada no cálculo da Pm

Um: tensão média de soldagem

V: fator de ciclo de pulso da equação 2.4 [42]

V_∞ : velocidade do fluxo do plasma em determinada distância real do eixo do arco

VC: carbetto de vanádio

Vga: vazão de gás de arraste

V_{gADP} : vazão de gás ao corpo do ADP comercial

Vgpl: vazão de gás de plasma

Vgprot: vazão de gás de proteção

Vmpo: vazão mássica de pó

Vp: velocidade das partículas de pó

V_{p0} : velocidade das partículas no ponto de injeção

Vs: velocidade de soldagem

$V_t = (v_x^2 + v_y^2)^{1/2}$: velocidade vetorial de tecimento

v_x : velocidade transversal da tocha, em tecimento

v_y : velocidade longitudinal da tocha, em tecimento

WC: carbetto de tungstênio

ZAC: Zona Afetada pelo Calor

α_p : ângulo de incidência do pó

$\Delta T = T_{pl} - T_p$: diferença de temperatura entre as partículas e o plasma

$\Delta T_2 = T_b - T_a$: salto de temperatura da partícula ao incidir sobre a poça

$\eta_p = P_w/P_{el}$: eficiência do processo

η_t : eficiência térmica

μ : viscosidade

ρ : pressão sobre a poça

ρ_m : densidade (massa específica)

RESUMO

Em vários setores industriais estão presentes mecanismos de desgaste da superfície das peças. Especialmente no setor de energia, por exemplo, hidrelétrica e de origem fóssil, que se caracteriza por produção intermitente em larga escala, se encontram situações de atrito entre superfícies. Surgem, então, solicitações mecânicas locais que levam à degradação das peças por intermédio de mecanismos de desgaste como abrasão, adesão, cavitação, os quais podem também estar combinados com fenômenos químicos, como corrosão. A proteção prévia por revestimento das áreas solicitadas leva ao aumento da vida útil das peças, ao mesmo tempo em que promove redução de custos. Para determinadas aplicações, é tecnicamente necessário que o corpo da peça apresente propriedades diferentes das do material da superfície. Em outros casos, o desgaste da peça é uma condição intrínseca presente, com a qual se deve conviver, realizando reparos periódicos, como quando é inviável técnica e economicamente a troca da peça (grandes dimensões). Neste caso, o reparo deve prover alta qualidade, de modo a majorar a vida útil da peça. Da mesma maneira, é desejável que o processo de revestimento possua satisfatória produtividade em sua aplicação.

Dentre os processos de revestimento se encontram diversas opções de tecnologias, cada qual com suas aplicações e peculiaridades técnicas. Para as aplicações consideradas neste trabalho, é necessária a premissa fundamental de que haja ligação metalúrgica entre o revestimento e o metal de base, originando de fato uma solda. Sendo assim processos que resultam em ligação apenas mecânica, como por exemplo, a Aspersão Térmica, não se adequam. Uma opção a ser considerada é o processo PTA-P (Plasma Transferred Arc - Pó) em operações de revestimento por soldagem. Este processo, devido a algumas de suas características funcionais, permite melhores resultados em relação a outros processos de soldagem atualmente aplicados em revestimentos, em relação, por exemplo, à baixa diluição e alta qualidade superficial. A possibilidade de se misturar diferentes pós também deve ser citada, principalmente no caso P&D de novos materiais. No entanto, apesar de ser utilizado industrialmente, o processo é complexo e seu campo de aplicações é restrito, assim como a literatura. Para que se proponha a introdução de um processo inovativo de soldagem, este trabalho objetivou estudo aprofundado e ensaios direcionados ao conhecimento das bases de seu funcionamento, em relação às possibilidades tecnológicas existentes e influências dos parâmetros sobre os resultados. Além disso, visa-se

viabilizar a ampliação a gama de aplicações, por intermédio de inovações tecnológicas, pautadas em conhecimento técnico-científico.

Estes fatores representam o cerne do trabalho, que, levando em consideração informações da literatura e experiência da equipe, resultou no levantamento do comportamento do processo para diferentes condições. Neste sentido, uma abordagem ampla foi necessária para possibilitar um melhor entendimento do processo. Da mesma forma, se geraram inovações tecnológicas em componentes do sistema (pulsção de pó, tocha e sistema de alimentação de pó, por exemplo) e em seu software de controle, as quais foram implementadas em um sistema integrado dedicado ao PTA-P.

ABSTRACT

Parts wear mechanisms emerge in a number of production activities. Especially in the energy sector, like hydroelectrical generation or oil and gas, which are characterized by intermittent large scale production, friction situations between parts and other parts or materials being transported or processed occur. Mechanical load thus arise, which lead to the degradation of parts, by means of wear mechanisms as abrasion, adhesion, cavitation, which may also take effect in combination with chemical phenomena, as corrosion. Previous protection, performed by coating of the loaded areas, leads to increase of part life, as well as to cost reduction, since the normally expensive resistant material can be employed only onto affected regions. Hence, the rest of the part can be manufactured with normal lower cost material. Moreover, for certain applications, it is technically necessary that the body structure of the piece has different properties from the ones of the surface. In other cases, part wear consists in an inherent condition, with which one has to deal with by performing periodic maintenance. In such situations, repair coating must provide high quality, in order to increase the layer's life. Likewise, it is desirable that the coating process permits satisfactory productivity.

Several different technologies are available in regard to coating, each one with specific application fields and technical peculiarities. Concerning the applications taken into account in the present work, one fundamental prerequisite is the metallurgical bond between coating and substrate, i.e. a weld. In this way, processes that result in a mechanical bond only, like Thermal Spray, do not apply. An option to be considered when it comes to coating procedures through welding is the PTA-P (Plasma Transferred Arc – Powder) process. Due to its functional characteristics, this process permits better results over other welding processes also employed in coating in relation to low dilution and high as-welded surface quality, for example. The possibility of mixing different powders must also be mentioned, mainly in the case of R&D of new materials. Nevertheless, although being industrially used, the process is complex and its application field is limited, as well as the available literature. For the proposal of the introduction of an innovative welding process in a determined application, this work aimed at deep investigation and trials targeting the knowledge of its basis in concern to existing technological possibilities and parameters' influence over the results. Additionally, there is the objective of making viable the

expansion of the application field of the process through technological innovations based on technical-scientific knowledge.

These factors represented the core of the present work, which, taking literature information and team experience into consideration, resulted in information about the behavior of the process under different PTA-P welding conditions. In this matter, a wide approach was needed to enable a better understanding of the process. In the same way, technological innovations were generated in the PTA-P system (powder pulsation, torch and powder feeder, for example) and in its control software, which were implemented in an integrated PTA-P dedicated welding system.

1. INTRODUÇÃO

O rápido desenvolvimento econômico mundial demanda continuamente maiores quantidades e taxas de produção. A conseqüente mecanização dos processos resulta em solicitações mecânicas de maior intensidade ou em maior escala devido ao contato dinâmico das partes dos equipamentos ou destas com o substrato sendo processado ou transportado. Em dependência da natureza dos elementos envolvidos, ataques químicos podem atuar de maneira exclusiva ou em conjunto com as solicitações mecânicas, contribuindo para o desgaste das superfícies das peças. Para que se mantenham estáveis as condições de produção, este fato leva à necessidade irrevogável de se a realizar manutenção ou a troca das peças desgastadas, o que acarreta em custos de materiais em si e decorrentes de paradas (serviços de terceiros, aluguel de equipamentos, etc...) que podem atingir altos níveis, ou de pré-revestimento das peças, antes de serem comissionadas. Como exemplo, na China o equivalente 100 – 150 milhões de Yuan (15 – 22,5 milhões de dólares) são perdidos em peças metálicas todo ano por desgaste [1]. Em alguns casos, a troca da peça é economicamente inviável, como em pás de turbinas de geradores em hidrelétricas.

A tecnologia de materiais tem evoluído em alguns de seus flancos no desenvolvimento de compostos resistentes ao desgaste, o qual ocorre na forma de diferentes mecanismos. Em se tratando de aplicações metálicas, muitas vezes tais materiais são ligas constituídas por elementos não convencionais na produção siderúrgica, de elevado custo e dificuldade de obtenção. Além disso, as próprias características intrínsecas dos materiais resistentes podem inviabilizar tecnicamente a fabricação de peças devido à impossibilidade de processamento em determinados casos. Mesmo quando há esta possibilidade, a extrema dificuldade de fabricação (baixa soldabilidade, por exemplo) pode exigir processos de alta performance, alta tecnologia, possivelmente inviabilizando também economicamente a manufatura das peças finais.

Dentro desta problemática, a solução encontrada é o revestimento superficial com material resistente, de superfícies sujeitas às solicitações causadoras de desgaste, sejam estas mecânicas e/ou químicas. Este revestimento pode ser realizado de maneira preventiva ou corretiva. Desta maneira, as peças podem ser fabricadas com ligas metálicas de menor custo e mais facilmente trabalháveis, ficando as ligas resistentes de alto custo presentes somente nas posições onde as suas propriedades são de fato necessárias, tanto para o caso preventivo, como corretivo.

Fatores econômicos, como investimentos em ativos permanentes, fluxo e volume de produção, e técnicos, como geometria, qualidade requerida e propriedades físicas dos materiais, determinam o tipo de revestimento a ser aplicado quanto ao processo, técnica, material da peça e material a ser aportado. Estão disponíveis comercialmente diversas opções, desde processos manuais de baixa produtividade até processos com equipamentos de alto custo, alta velocidade e repetitividade de posicionamento, com alta densidade de energia (por exemplo, laser robotizado).

Apesar de o escopo do presente trabalho ser composto por desenvolvimentos do processo de soldagem Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó (PTA-P) que podem beneficiar diferentes aplicações, ênfase é dada nos procedimentos de revestimento sobre peças encontradas nos setores de P&G (Petróleo e Gás), e Geração de Energia. Estas áreas são vistas como estratégicas e têm representado significativa proporção dos investimentos no Laboratório de Soldagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, LABSOLDA – UFSC.

Para determinadas aplicações nos setores industriais supracitados alguns processos de revestimento são excluídos prontamente por não atingirem especificações requisitadas e outros são suplantados pelas vantagens atingíveis pelo processo PTA-P. Primeiramente, trata-se de um processo de soldagem, resultando, portanto, em uma união metalúrgica entre as camadas depositadas e o substrato e entre as camadas sequenciais, ainda que com uma diluição muito baixa. Pelo contrário, a Aspersão Térmica, utilizada também para revestimentos metálicos, com diluição zero, apresenta união por agarramento mecânico do material depositado na rugosidade superficial do substrato, o que a inabilita para certas aplicações onde há solicitações de impacto mecânico, por susceptibilidade a descolamento.

Outras vantagens atribuídas ao processo PTA-P que o destacam entre os processos de revestimento metálico por soldagem se relacionam ao fato de ser um processo a eletrodo permanente, o que permite a regulação independente entre a energia fornecida e a adição de material. Torna-se possível, assim, executar um controle do calor aportado ao material de adição, de acordo com as necessidades e dentro de determinada faixa de operação. Quando, por exemplo, se busca menor penetração / diluição e maior espessura de camada, é possível introduzir maior quantidade de material, que consumirá maior proporção da energia total, em detrimento da energia imposta à peça. No caso específico do PTA-P há ainda a possibilidade de se atuar nas quantidades de calor à peça e ao

material de adição por intermédio do arco piloto. Ao se trabalhar com maiores energias no mesmo, a energia do arco principal pode ser reduzida para a mesma quantidade de metal depositado, reduzindo-se a diluição. A menor diluição alcançada resulta em maior pureza do metal nobre adicionado em relação à contaminação proveniente do metal de base, o que, conseqüentemente, reduz a exigência quanto ao número mínimo de camadas sobrepostas necessárias para que a superfície apresente as propriedades resistentes do metal adicionado. Isto, naturalmente, reduz custos com consumíveis nobres e, mais significativamente, custos de mão-de-obra, que é o maior percentual do dispêndio total [2, 3].

Um dos fatores mais expressivos quando da tomada de decisão pelo PTA-P reside na natureza do material de adição, em forma de pó, cuja composição química pode ser manipulada flexível e agilmente conforme demandas de aplicações. Como mencionado, o acelerado desenvolvimento econômico tem como uma conseqüência o desenvolvimento de diferentes materiais metálicos. Durante as atividades produtivas, muitos desses novos materiais necessitam ser soldados e não há prontamente o consumível compatível no mercado. De fato, a simples mistura de pós metálicos (podendo conter partículas não metálicas, como cerâmicas), não define uma nova liga completamente aplicável à determinada situação, pois pós separados se comportam de maneira diferente de ligas fundidas e transformadas em pó, quanto a possíveis segregações no transporte do pó até a tocha (por diferença de densidade) e por diferentes comportamentos térmicos no arco (fusão heterogênea, perda de elementos por vaporização). Entretanto, se obtém rapidamente um avançado ponto de partida na busca por uma composição que se mostre adequada.

A rigidez do arco principal, proporcionada pela presença do gás de plasma e do arco piloto, colabora para a obtenção de melhor controlabilidade da poça metálica e melhor acabamento superficial dos cordões depositados. Portanto, surge a possibilidade de redução de tempos secundários de retrabalho, tanto para adequação da superfície para deposição de camadas sucessivas, como para recuperação do perfil original da peça ou obtenção da qualidade superficial necessária à determinada operação.

As propriedades vantajosas creditadas ao PTA-P, as quais serão detalhadamente abordadas no decorrer do texto, formam uma rede onde umas influem nas outras, culminando em benefícios produtivos com potencial para impactos sensíveis na economia de empresas usuárias. Primeiramente, se vislumbra redução de custos, a partir de menos retrabalho, menos desperdício, menor tempo total de manutenção e menor

quantidade de material de elevada resistência e alto custo. Cita-se também o menor tempo de paradas para manutenção, que ocasionam eventualmente cessão de lucros e interrupção de fornecimento a clientes internos (desbalanceamento em linhas de produção) ou externos. No caso de paradas com duração programada, se possibilita maior área de revestimento depositado ao fim do período. O maior tempo de vida útil obtido pelos revestimentos proporciona maior disponibilidade de máquina. No âmbito da saúde, pode-se atingir menor tempo de exposição do soldador a ambientes de risco (como por exemplo, entre pás de turbinas de geração hidrelétrica), assim como menor quantidade de fumos e ausência de respingos, comuns em outros processos a arco. E o menor consumo de energia, menor desperdício e descarte de material reduzem o impacto ambiental de toda a operação.

Com estas justificativas em mente, enfatizando aplicações nos setores industriais de Geração de Energia e Petróleo e Gás, se objetiva alcançar conhecimentos científicos e tecnológicos inovadores sobre o processo PTA-P que direcionem o projeto dos componentes do sistema e a formulação de procedimentos de soldagem de maneira a obter as vantagens ora citadas em revestimentos metálicos. Para isso, é necessário visa-se investigar influências paramétricas do processo na qualidade do resultado e robustez do processo, assim como conceber, projetar, implementar, testar e aperfeiçoar inovações tecnológicas que possam também vir a impactar os resultados.

1.1. Considerações do Setor de Geração de Energia

Em termos de aplicações do processo PTA-P, uma das ramificações deste trabalho se estende ao setor de geração de energia elétrica. Uma das medidas de desenvolvimento de um país é o acesso da população à energia, impulsionador determinante para o desenvolvimento econômico. Assim, investimentos no setor, que resultem em maior qualidade e eficiência de produção são preponderantes [4]. Anos atrás, o LABSOLDA, em parceria com uma empresa estatal de energia, desenvolveu o processo e procedimentos de soldagem MIG/MAG Pulsado com Pulsação Térmica ® [5], dedicado à recuperação de erosão por cavitação em pás de turbinas de geradores hidráulicos, o qual foi adotado como padrão para essa operação. (É interessante citar que cerca de 70 % da energia elétrica produzida no Brasil é de origem hidráulica [4, 6].) Posteriormente a mesma empresa foi privatizada, consolidando hoje a maior empresa privada de geração de energia elétrica do Brasil, detendo

8% do total nacional [6]. Já nesta nova situação, se executou novamente um projeto em parceria com o LABSOLDA, que desta vez abordou o revestimento de paredes d'água em caldeiras de unidades de geração termelétrica.

Melhorias nos processos de manutenção dessa empresa, algumas das quais são alcançáveis com a utilização do PTA-P, podem surtir impacto econômico considerável, já que 80 % da sua geração vêm de suas usinas hidrelétricas (6 unidades) e 20 % de suas termelétricas (7 unidades). O maior conjunto gerador termelétrico a carvão da América Latina é uma delas [6], e com ele o LABSOLDA mantém atualmente um projeto de automação da soldagem das paredes d'água, que também abordará a soldagem PTA-P.

A eficiência operacional é um fator decisivo para os resultados financeiros ao fim do ano fiscal, e depende em parte da qualidade dos serviços de manutenção. A empresa citada, por exemplo, tem trabalhado com uma eficiência operacional de 97 % nos últimos anos (descontadas paradas programadas), permitindo inclusive exportação do excedente [6].

1.2. Considerações do Setor de Petróleo e Gás

Assim como no setor energético (onde houve aumento de consumo no último ano [6]), as turbulências econômicas internacionais causadas pela crise imobiliária americana não afetaram o setor de construção naval, cujo maior cliente no Brasil são empresas de Petróleo e Gás. Existe, por exemplo, no momento uma demanda colocada para 214 novos navios para a Petrobras e Transpetro a estaleiros nacionais até 2015, segundo o último cenário desenhado pelo Sindicato da Indústria da Construção Naval [7]. Vale lembrar que, depois do Rio de Janeiro, Itajaí, SC (nas proximidades de Florianópolis, onde o presente trabalho é conduzido), é a cidade com maior número de estaleiros, 4, com 7,8 % da capacidade nacional de processamento de aço [7].

Nota-se a importância estratégica desta indústria, e da eficiência em suas operações, incluindo construção e manutenção naval. Tanto é verdade, que se criou um Fundo Setorial governamental do Transporte Aquaviário e Construção Naval, dedicado ao fomento de desenvolvimento tecnológico em áreas relacionadas.

Em se tratando diretamente de exploração e produção de Petróleo e Gás, também se nota um horizonte em expansão. O Plano de Negócios 2009-2013 da Petrobras [8] revela uma meta de crescimento na produ-

ção de atuais 2,757 milhões de boe /d (barril de óleo equivlente / dia) para 5,729 milhões de boe/d em 2020.

Naturalmente acompanhará a rampa de ambos os setores de construção naval e exploração/produção uma forte demanda quantitativa e tecnológica relacionada à soldagem, que é o processo de fabricação mais aplicado nessas indústrias. Aqui também se vê a possibilidade de aumento da eficiência e qualidade do processo produtivo e de manutenção por intermédio da utilização, em aplicações pertinentes (revestimento anti-corrosivo de tanques dutos e recuperação de navios, revestimentos anti-abrasivos em válvulas e equipamentos, por exemplo) do processo PTA-P.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E ESTADO DA ARTE

No trabalho de Díaz [9] são expostas as características diferenciadas fundamentais entre o processo PTA-P e o processo PAW (Plasma Arc Welding) com adição de arame, designado por aquele autor como PTA-A (Plasma de Arco Transferido Alimentado com Arame) em relação à alimentação de material.

A seguir, neste texto, são abordados com maior aprofundamento os componentes de sistemas PTA-P encontrados no mercado ou objetos de pesquisas em andamento ou já encerradas em diversas instituições no mundo. A oferta de literatura especializada neste processo não é farta como o é para outros processos, porém os artigos, tanto técnicos, como científicos, relatam uma diversidade de princípios construtivos de tochas e ADPs (alimentador de pó), parâmetros disponibilizados para regulação, influências e faixas operacionais dos mesmos, a partir dos quais foram concebidas as pesquisas e inovações resultantes do presente trabalho. Seguindo uma tendência contemporânea no universo dos processos de soldagem, relata-se também como o PTA-P tem sido combinado com o processo Laser a fim de se obter um processo híbrido.

2.1. Breve histórico do processo PTA-P

O surgimento do Processo Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó (PTA-P) é colocado sob óticas diversas por diferentes autores. Apesar disso, existe certa congruência quanto à época na qual houve a apresentação pública do processo (início da década de 60 [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]) e ao seu criador, a Union Carbide Co. [11, 13, 16]. Mais precisamente, a citada empresa demonstrou o processo na 42ª Reunião Anual da AWS, o qual foi patenteado em 03/11/1961, sob a denominação “Procedimento e Aparato para Aporte de Pó Metálico, Depositado e Soldado com Plasma de Arco Transferido” [16]. Porém, em outra fonte [19], a criação do processo remete à década de 50 e apenas o início de sua comercialização aos anos 60. É provável que essa fonte tenha se baseado na primeira patente de tocha Plasma, de 1953 [17]. Já no Japão foi a empresa Daido Steel quem obteve a patente do processo PTA, em 1973 (denominado por esta companhia de Plasma Powder Welding, PPW) [13]. Como primeiras aplicações, se faz alusão a revestimentos soldados de alta qualidade na indústria nuclear [10].

A partir de então o processo se difundiu. A designação mais disseminada é PTA (Plasma Transferred Arc). Segundo Dolles [20], que chama o processo de Plasma-Pulver-Auftragschweissen ou Plasma-Powder-Welding, o PTA-P se encontra na classificação de Revestimento, subclassificação Revestimento do Estado Líquido ou Pastoso, da norma DIN 8580. Porém, variações de nomenclatura são encontradas: PPW [13], Powder Plasma Hardfacing [1], Powder Plasma Arc Welding [11, 21 (PPAW)], Plasma Pulver-Auftragschweissen [22, 23] Plasma weld surfacing [24], Plasma Arc Powder Surfacing [24, 25], Plasma Transmitted Arc [26], Plasma Transferred Arc wearfacing / hardfacing / wear surfacing [27].

2.2. Vantagens do PTA-P

Algumas propriedades do processo e dos resultados alcançáveis pelo PTA-P são comumente mencionadas na literatura como vantagens deste processo de revestimento sobre outros métodos. Menos freqüentes, no entanto, são as explicações da origem científica destas características benéficas, assim como das condições sob as quais estas são obtidas. Sobre outros processos de revestimento sem fusão do material de base, o PTA-P tem a vantagem principal de resultar numa união metalúrgica [10, 11, 16,17,18, 19, 21, 25, 26, 27, 28, 29].

A característica chave que é creditada ao PTA-P, no entanto, é a constrição, ou colimação, do arco via bico constritor [17], originando vários outros diferenciais competitivos. Em relação ao processo TIG, por exemplo, a coluna do arco PTA-P é mais homogênea e menos divergente, indicando pressão de contração magnética auto-induzida (como no “efeito pinch”) também maior e mais homogênea, segundo [30, 31]. Alta taxa de fusão do pó é permitida, segundo [23, 26, 32, 33], pela alta concentração de energia e pelo fato de que o pó é um formato de material que fornece maior área superficial de troca de calor no sistema, resultando em melhor aproveitamento da energia do arco para propriamente a fusão do material de adição. A melhor eficiência de fusão, segundo [11, 34] também permite correntes menores e, então, menor aporte térmico.

Neste ponto se faz uma ressalva. Apesar de grande parte da literatura afirmar “maior taxa de fusão pela maior concentração de energia” do PTA-P em comparações com o TIG, as condições mostradas revelam, na maioria das vezes, situações nas quais a potência para o PTA-P é intrinsecamente maior, pela maior distância do eletrodo à peça. Ou

seja, as comparações são aqui transpostas como informação da literatura, porém acompanhadas de crítica em relação à falta de uma definição mais embasada de critérios comparativos.

Em [34] também é afirmado que o pó, ao entrar em contato com a peça, absorve calor da mesma resfriando-a em certo grau, o que pode ajudar a reduzir também a diluição, teoria também defendida por Pavlenko [35]. Adicionalmente, a maior densidade de corrente torna o arco mais rígido, reduzindo sua suscetibilidade a desvios oriundos de campos magnéticos ou elétricos externos [36]. Quanto a este quesito, entretanto, foi verificado em [9] que há um limite inferior de velocidade de soldagem para determinadas dimensões de peça e tipo de bico constritor, abaixo do qual acontece aquecimento excessivo, capaz de resultar em desvios no cordão de solda por sopro magnético.

Uma comparação ilustrativa da concentração de energia de vários processos de soldagem pode ser vista na Figura 2.1 [23] e na Tabela 2.1. Ao se observar ambas, reitera-se a crítica anteriormente expressada, no sentido de que as comparações devem apresentar critérios, pois as faixas de valores de potência são amplas e as tecnologias são flexíveis. (Nota-se, inclusive, uma inversão das posições dos processos MIG e TIG !)

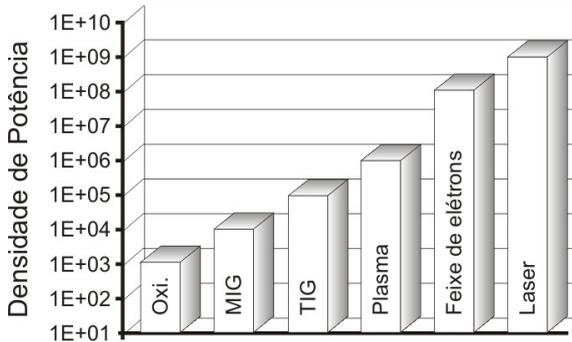


Figura 2.1. Concentração de energia de diferentes processos de revestimento por soldagem, em W/cm^2 [23]

Tabela 2.1. Fontes de calor e respectivas densidades de potência

Processo	Densidade de potência (W/cm ²)
TIG	10 ² - 10 ⁴ [11]
	10 ³ - 10 ⁴ [33]
MIG	10 ³ - 10 ⁴ [33]
Plasma	10 ³ - 10 ⁶ [11]
	10 ⁴ - 10 ⁵ [33]
Feixe de elétrons	10 ⁵ - 10 ⁸ [11]
	10 ⁶ - 10 ⁹ [33]
Laser	10 ⁵ - 10 ⁷ [11]
	10 ⁶ - 10 ⁹ [33]

A Tabela 2.2 é apresentada em [16], contendo eficiências térmicas de diferentes processos de soldagem. O autor mantém-na num nível informativo, enfatizando que os valores podem variar muito de acordo com as condições operativas presentes. Além disso, a eficiência de fusão seria uma informação mais importante.

Tabela 2.2. Eficiência térmica (quociente entre potência gerada no arco e absorvida pela peça) de vários processos de revestimento por soldagem [16]

Processo	Eficiência térmica η (%)
TIG	25 - 50
PTA	50 - 60
MIG	60 - 70
Eletrodo Revestido	65 - 85
Arco Submerso	95 - 98

É possível encontrar, como em [33], também comparações das temperaturas de plasma alcançadas nos diferentes processos a arco (Figura 2.2). Notadamente, se trata de uma comparação genérica ilustrativa, pois o autor também não fornece quaisquer parâmetros mantidos constantes (inclusive há evidente diferença nos comprimentos de arco). Conclui-se que a intenção é também apontar maior constrição do arco, através da faixa de temperaturas superior do processo PTA-P. (Questões sobre constrição do arco no PTA-P foram alvo de investigações do presente trabalho e serão abordadas adiante.)

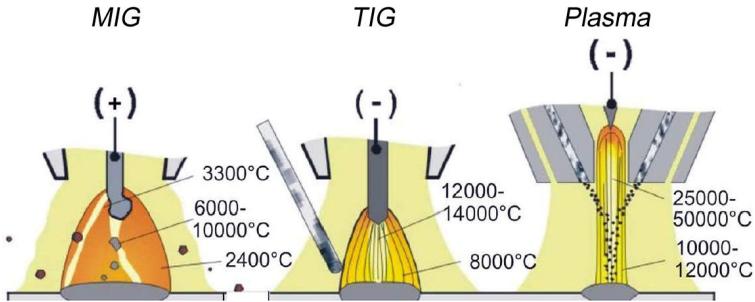


Figura 2.2. Comparação de temperaturas do arco para diferentes processos de soldagem a arco [33]

Alta taxa de deposição é uma das vantagens do PTA-P mais difundidas no mundo da soldagem. Juntamente com a diluição, é citada como o parâmetro primordial na seleção de um processo de revestimento [1]. Na verdade, existem outros aspectos, como a aplicação da peça trabalhada e os materiais envolvidos. Mas o fato de que, em outros processos de revestimento por soldagem a arco, maior taxa de deposição significa maior energia necessária e, em conseqüência, maior diluição, de fato joga a favor do PTA-P [1], que possui independência (dentro de uma faixa operacional) entre energia e aporte de material.

De maneira direta, sem maiores detalhes, a literatura enumera como vantagens do PTA-P: bom acabamento superficial [11, 14, 17, 21, 28, 32, 37, 38], com menor índice de retrabalho [14, 17, 33], alta taxa de deposição [1, 10, 11, 14, 28, 37, 38, 39, 40], baixa diluição [10, 19, 21, 27, 28, 32, 37, 38, 40], alta densidade no depósito [21, 37, 41], ausência de porosidade [21, 33], ausência de inclusões [17, 21, 32], alta variabilidade da liga a ser depositada (combinações de várias propriedades e possibilidade de fabricação de ligas que não podem ser produzidas em outra forma, sendo que alguns usuários misturam suas próprias ligas) [10, 17, 18, 19, 23, 25, 26, 28, 32, 37, 38, 39, 40, 42, 43, 44], menor custo em geral do pó em relação a varetas e arames [28]. Esta vantagem advém do fato de que a produção do pó é contínua: fusão, atomização e classificação granulométrica. Não é necessário trabalho mecânico ou corte, e muito pouco material é desperdiçado [38]. A lista de vantagens se estende com: controlabilidade sobre a espessura da camada [17, 18, 27, 28, 32, 38], alta velocidade [28, 45 (Tabela 2.3)], baixa suscetibilidade à falta de fusão, vazios e trincas [23, 37], microestrutura mais refinada [17, 37, 39, 46, 47] e baixo desperdício [14, 17, 38, 39]. A alta

dinâmica da poça de soldagem, devida à alta densidade de corrente, garante propriedades homogêneas em toda a seção do cordão de solda [23, 46]. Há de se citar o fato de que as ligas resistentes, mais caras, podem ser utilizadas somente nas superfícies solicitadas, sendo que o restante da peça pode ser fabricado em material menos nobre, de menor custo [19, 26, 42, 48].

Tabela 2.3. Comparação ilustrativa da velocidade de soldagem. (Não foram fornecidos os parâmetros de comparação, fato que mantém os resultados num nível apenas informativo e genérico.) [45]

Processo	Velocidade de soldagem
TIG	20,0 cm/min
MIG	35,0 cm/min
PTA-P	50,0 cm/min

Em [24], se estuda a aplicação de pseudoligas (alimentação separada da matriz metálica e de material duro), descrita no item 2.8 deste texto, e se afirma que, em geral, arames são muito mais baratos que pós (discordando de [28], como visto anteriormente), e também que há muito menos variedade de ligas em pó que em arame. De acordo com a experiência do autor do presente trabalho, há realmente dificuldade em se encontrar ligas especiais em pó, o que se acentua pela inexistência de fornecedores nacionais de pós para PTA-P. Por outro lado em um projeto do LABSOLDA / UFSC paralelo ao desenvolvimento desta tese, se lança mão da vantagem da flexibilidade e facilidade em se misturar pós, mesmo que num primeiro momento triturados e não pré-ligados. (Ribeiro [49] obteve bons resultados em resistência à cavitação com esse tipo de material.)

A diluição para o PTA-P pode ser reduzida à ordem de 5 % [1, 17 23, 28, 32] (ou 2% a 3% [12]) em vantagem sobre outros métodos (com MIG ou TIG: 30 % [28] ou 20% a 25% [27]; com MIG: 20% e com ER: 27% [50]; com TIG: 8% a 13% [12]). A Tabela 2.4, apresentada em [29], mostra uma comparação da diluição média para diferentes processos de soldagem a arco, mesma composição do material de adição e mesmo material de base. Com baixa diluição, é possível conseguir a resistência almejada em um ou poucos passes de soldagem, reduzindo custo de materiais, o que também é proporcionado pela possibilidade de se utilizar, para o corpo da peça, materiais não ligados de menor preço [17, 23, 37].

Tabela 2.4. Comparação da diluição média entre diferentes processos [29]

Forma do material de adição	Processo de soldagem	Diluição média
Vareta	TIG	20%
Eletrodo Revestido	ER	25%
Pó	PTA-P	3%

De acordo com Bewley [27], a menor diluição propiciada pelo PTA-P se deve ao fato de que neste processo a energia nunca está diretamente focalizada sobre o substrato. Ao invés disso, a poça metálica está sempre sob o arco, tendendo a isolar o substrato do contato direto com o arco. Marconi [16] cita, do mesmo modo, que a maior parte do aporte térmico à peça deve ser absorvida pelo pó que é aportado. A explicação fornecida em [35] atribui a menor diluição do PTA-P à transmissão de calor da poça ao pó incidente. Esse fenômeno resulta num resfriamento da poça. O mencionado isolamento realizado pela poça pode realmente contribuir para baixa diluição, mas, em experiências no LABSOLDA, se nota que valores altos de corrente do arco principal ou vazão de gás de plasma podem causar grande depressão sobre a poça e conseqüente alta penetração. Acredita-se também que o projeto da tocha, quanto ao tipo de injeção de pó, tenha influência decisiva sobre essa questão.

Aspectos ambientais se tornaram já há tempos uma preocupação presente nos processos industriais, assim como também saúde e bem estar da força produtiva. Neste contexto o PTA-P apresenta uma clara vantagem em relação a processos de aspensão, nos quais há intensa geração de ruído e de pó residual [51]. O melhor desempenho ambiental do PTA-P também fica evidente contra processos que formam escória. Nas informações da empresa COMMERSALD [45] é mencionado um certificado do Instituto Ecoricerche, no qual, numa comparação de fumos de soldagem, o PTA-P mostrou menores níveis de emissão que processos convencionais de soldagem.

O melhor acabamento superficial resulta em menor quantidade de material removido mecanicamente (menos resíduos), para obtenção da geometria final desejada.

2.2.1. Comparações diretas com outros processos

Alguns trabalhos realizaram comparações diretas entre o processo PTA-P e outros, especificamente para operações de revestimento, sob diferentes critérios e condições. Em [37] é apresentado o gráfico em rede da Figura 2.3, comparando qualitativamente o desempenho do PTA-P com o do TIG em relação a diferentes aspectos.

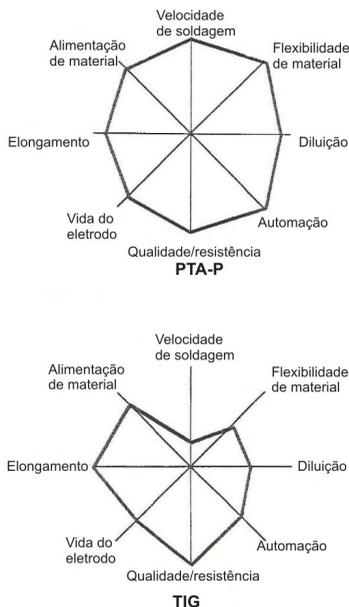


Figura 2.3. Comparação qualitativa de desempenho entre TIG e PTA [37]

Sem necessidade de fluxo no PTA-P, sua vantagem em relação direta ao Arco Submerso (SAW – Submerged Arc Welding) reside na ausência de possibilidade de inclusões do fluxo ou da escória no depósito [38]. Este mesmo trabalho relata uma comparação prática, obtida em uma empresa americana, na qual se demorava 60 minutos para revestimento em uma peça de 150 mm de comprimento com o processo a Oxiacetileno. O *upgrade* para o PTA-P mecanizado resultou num tempo de 15 minutos para a mesma tarefa. E isto não resulta em maior necessidade de habilidade do operador. Em experiência própria no LABSOLDA,

soldadores de outros processos precisaram de apenas um dia para se adaptar e realizar soldas aceitáveis com o PTA-P.

Como mencionado anteriormente, o PTA-P cria uma união metalúrgica entre revestimento e substrato, com resistência à tensão similar a um dos dois, o que for menor, chegando a cerca de 550 MPa (80.000 psi). Diferentemente, na Aspersão Térmica o material em pó ou arame é aquecido até um estado semifundido por uma chama ou plasma e acelerado em direção à peça [27]. A união é mecânica [10, 27] e fica numa faixa de 35 MPa a 70 MPa (5.000 psi a 10.000 psi) [27] e a utilização é restrita a desgaste por abrasão [16]. Naturalmente estes valores de resistência à tensão podem variar em diferentes condições, e acredita-se que o autor de [27] se baseou em valores médios usualmente alcançados com uma determinada combinação de materiais para explicitar a diferença. Na comparação entre PTA-P e a Aspersão Térmica realizada em [41] era esperada maior resistência à corrosão da segunda, devido à sua diluição teórica de 0 % contra, aproximadamente, 5 % do concorrente. Entretanto, ocorreu o contrário, fato que levou à hipótese de que a existência de porosidade (presente na Aspersão Térmica) é mais prejudicial à resistência à corrosão do que a diluição com o substrato (presente no PTA-P).

Dentro da aplicação de válvulas automobilísticas, uma das mais citadas na literatura, [39] compara resultados de depósitos de Stellite 6 sobre o aço EMS-235 aplicados com chama oxiacetilênica e PTA-P. A Figura 2.4 mostra as linhas de variação de concentração de Fe na interface dos materiais para ambos os processos. Devido ao menor aporte térmico e menor ciclo de soldagem, o PTA-P apresenta uma transição muito mais brusca que a chama oxiacetilênica no teor de Fe. A cerca de 0,13 mm da interface, a concentração de Fe, no caso da chama, chega a 18 % no revestimento, enquanto no PTA-P esse valor fica em 8 %. O menor ciclo de soldagem também resulta em menor crescimento de grão para o PTA-P, dificultando propagação de trincas. Além disso, devido à falta de agitação da poça metálica no caso da chama, a concentração do Fe se mantém alta na interface (diferentemente do PTA-P, onde a agitação garante homogeneidade na composição do revestimento [23] e menos porosidade [52]). Concentrações de Fe próximas a 20 % causam maior suscetibilidade a corrosão nesta área.

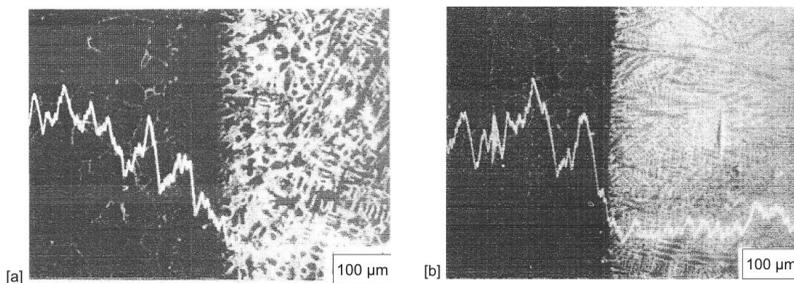


Figura 2.4. Linhas de concentração de Fe na interface revestimento – material de base para a) chama e b) PTA-P [39]

Na mesma figura também é possível perceber maior refino de grão obtido pelo PTA-P.

Uma comparação similar é encontrada em [44], onde o conteúdo de Fe no metal de solda cai muito mais acentuadamente para um revestimento depositado por PTA-P do que em um depositado por TIG (Figura 2.5).

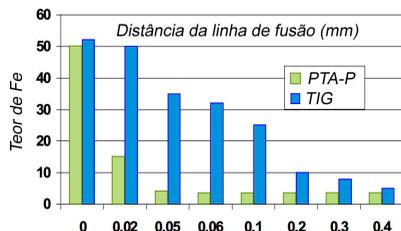


Figura 2.5. Variação do teor de Fe a partir da linha de fusão no sentido do metal de solda [44]

Naturalmente, o processo PTA-P apresenta limitações em relação a outros processos. Dentre elas, citam-se relativo alto custo do equipamento e menos eficiência de deposição que arame [19]. Apesar de [38] e [39] mencionarem baixo nível de desperdício de material no PTA-P, [17] relatar um rendimento de deposição de 95 % e Diaz [9] ter calculado este índice entre 87% e 97%, de fato [53] e [54] reportam total ausência de respingos nos processo TIG Alimentado com Arame e PTA-A, respectivamente. Outros fatores que intimidam o crescimento do uso da soldagem Plasma em geral são citados em [12]: falta de conhecimentos

básicos da engenharia do processo, repetitividade não satisfatória (que leva à baixa confiabilidade [40]), maiores custos que outros processos (quando as vantagens não são adequadamente conhecidas), profusão de parâmetros e pouco conhecimento do operador [16]. Pode-se adicionar, também, a complexidade da pistola. Estes aspectos estão interligados, e a superestimação do processo pode trazer decepções, quando colocado na produção.

A decisão pela escolha da tecnologia a ser empregada deve, como para qualquer processo de fabricação, ser tomada com base em determinados critérios. Em uma aplicação de revestimento de válvulas de motores de combustão interna, por exemplo, o revestimento à chama não foi completamente substituído pelo PTA-P, pois se considera que esta seleção deve depender dos custos do investimento, volume de produção e qualidade metalúrgica requerida no produto final [39, 55 (adicionando custos de operação a esta lista)]. [51], por exemplo, relata o *cladding* com diluição zero de mancais de escorregamento e superfícies selantes de válvulas, para os quais a força de adesão gerada por deposição de liga metálica em pó via processo plasma de arco não transferido é suficiente. Em [39], o autor aborda a questão das tensões residuais geradas por cada processo para determinadas combinações de material de aporte e de base. No caso de uma válvula em inox austenítico (21-4N) e material de adição em liga de Co (Stellite 6), a chama oxiacetilênica resulta em tensões compressivas na superfície, o que é benéfico para a válvula em serviço. Isso acontece por que as taxas de resfriamento da base e do revestimento são similares. Como o aço inoxidável contrai em maior intensidade, impõe compressão no revestimento. Ao contrário, no PTA-P, o calor está mais concentrado sobre o revestimento (concordando com [27], que inclusive cita esse fato como facilitador de menor diluição). Devido a isto, e a que a válvula transfere calor rapidamente para a base de Cobre sobre qual está apoiada, a peça resfria mais rapidamente e, assim, resiste à posterior contração do revestimento, e este acaba sujeito a trações trativas. Isto resulta em necessidade de tratamento térmico pós solda. Se o material da válvula for à base de Ni, não se têm tensões trativas significativas.

Em relação ao fator investimentos, o dispêndio não significa apenas o equipamento de soldagem, mas também sistemas de automação (se for o caso), dispositivos de fixação, treinamento, novas qualificações de procedimento, etc. A esses fatores, é somada em [17] a baixa portabilidade do sistema. Esta restrição, no entanto, é atacada em projetos do LABSOLDA que prevêem o projeto de um sistema integrado e compacto, para aplicação dentro de ambientes de mobilidade limitada ou difi-

cultada, como caldeiras de termelétricas, turbinas de hidrelétricas e pá-tios de estaleiros.

2.3. Aplicações do PTA-P

Como citado no Capítulo 1, diversas são as aplicações onde o revestimento superficial por PTA-P pode vir a trazer benefícios, como maior resistência à corrosão, desgaste e a altas temperaturas, coincidentes com maior vida útil, economia em materiais caros, e redução do custo de produção.

Dentre as aplicações mais citados estão: válvulas, assentos de válvulas (automotivas, navais – Figura 2.6, locomotivas) [10, 14, 17, 21, 22, 29, 32, 39, 45, 56], mas também encontram-se na literatura fusos extrusores [10, 21, 22, 40, 47, 48], peças da indústria naval [21], petróleo e gás (Figura 2.7) [17, 21, 29, 32, 45, 48], geração de energia (um dos objetos do presente trabalho) [21, 32], facas industriais [21, 26], equipamentos para mineração [21], moldes em fundição [21, 34], aplicações sobre ferros fundidos [12, 25, 33, 34], equipamentos da indústria de papel [21,], equipamentos da indústria agrícola [21], indústria nuclear [21, 29], indústria de plásticos [14, 17, 26, 29,], alimentícia [26], de madeira [26] e setor químico [14, 17, 21]. No caso de facas para a indústria de papel e celulose é reportado em [23] um incremento de até seis vezes na vida útil (aumento da tenacidade), para custos similares de fabricação. Também neste ramo, em [26] é mencionada a vantagem de se poder utilizar no corpo da peça um material não ligado (menor custo) e apenas no revestimento material de alta liga, pois a baixa diluição garante salto nas propriedades mecânicas na interface substrato / camada soldada. Neste caso, o PTA-P substituiu o Eletrodo Revestido ER, resultando em maior homogeneidade nas propriedades do depósito e, consequentemente, maior vida útil. Peças que sofrem solicitações de cisalhamento e impacto também podem se beneficiar de revestimentos metálicos [38].



Figura 2.6. Exemplo de aplicação na indústria naval – válvula de motor marítimo e assento de válvula [45]



Figura 2.7. Exemplo de aplicação na indústria de petróleo e gás – válvula de esfera [45]

Uma aplicação não convencional do processo é o revestimento de peças de alumínio com ligas duras. O objetivo final é tornar possível o uso deste material e seus benefícios (baixa densidade, resistência à corrosão) em aplicações para as quais ele não pode ser utilizado pela sua baixa resistência ao desgaste. É necessária, portanto, melhoria das características superficiais de resistência ao desgaste abrasivo e adesivo, dureza e tenacidade [10, 18, 36 na construção naval, 52]. Para o revestimento de alumínio são apresentadas três técnicas, em [18]: *Auftragen* (recobrimento), na qual se objetiva a menor diluição possível; *Legieren* (liga, *alloying* [36, 52]), na qual se objetiva a formação de uma nova composição química, nova liga na superfície, através de alta diluição; e *Dispergieren* (dispersão), na qual se realiza o depósito de partículas duras, evitando-se sua fusão. Em [18] foi utilizada a técnica DCCP (Direct Current Combined Polarity - Corrente Contínua Polaridade Combinada), explicada no item 2.8, necessária para remover a camada de óxi-

do da superfície, a qual pode resultar em inclusões, faltas de fusão no campo microscópico e porosidade.

Em se tratando especificamente do setor petroquímico, [37] aborda a aplicação por PTA-P de ligas de Ni e Co, que devem aumentar a resistência e, portanto, a vida útil de partes que estão submetidas a condições agressivas de corrosão, desgaste e altas temperaturas. Anéis de vedação em bombas são *key parts* (peças-chave) no setor petroquímico e, por isso, o prolongamento de sua vida útil é importante tarefa de manutenção desta indústria. Sendo assim são revestidos por PTA-P com ligas duras anti-desgaste de Ni com WC. Do mesmo modo, assentos e núcleos de válvulas também são peças-chave de vasos de pressão na área petroquímica. Portanto, para satisfazer requerimentos de resistência à alta temperatura e desgaste na face de selagem, liga de Cobalto é aplicada por PTA-P [37]. Em [29] se encontra uma comparação de produtividade para o revestimento de assentos de válvulas do setor petroquímico. A operação com o processo TIG demandava três passes de solda para evitar efeitos da diluição; inclusão de óxidos e porosidade era causa de alta porcentagem de rejeitos e eram necessários de 14 a 20 minutos. O ciclo com PTA-P foi reduzido para 5 minutos. No mesmo setor existe também recobrimento de peças de perfuração [29, 38] na exploração de petróleo. Neste caso são utilizadas ligas de Ni-Cr-Si-B, que, a propósito, como ligas de Co e WC, não podem ser fabricadas em arame maciço.

Além das soldas de revestimento (que consiste na grande maioria das aplicações), procedimentos de união têm sido objeto de investigação de alguns centros de pesquisa, no intuito de se verificar o potencial de melhorias com o PTA-P.

Uma aplicação de união por soldagem na qual o PTA-P já foi introduzido industrialmente é descrita em [11]. Trata-se da solda de tubos de aço inoxidável austenítico de parede espessa, de até 15,0 mm de espessura de parede, 222,0 mm de diâmetro externo. Neste procedimento, é executado o chanframento das juntas em V, com nariz. O primeiro passe é realizado com a técnica *keyhole*, na qual o arco plasma faz um furo na junta (nesse caso, no nariz do chanfro), fundindo o material de base à sua frente o qual se direciona pelas laterais do furo à parte traseira do furo, onde se solidifica e forma a solda. Sem espaçamento, foi possível chegar a uma penetração de 8,0 mm, ou seja, foi possível utilizar um nariz com essa dimensão no chanfro. Em seqüência, é realizado um passe de enchimento, com o processo PTA-P e a mesma tocha do passe de raiz. Um dos resultados está na Figura 2.8, para duto de 11,0 mm de espessura.

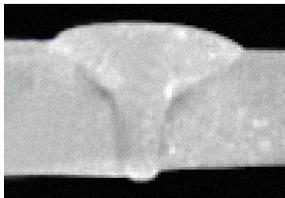


Figura 2.8. Macrografia de solda de tubo de aço inoxidável austenítico, 11,0 mm de espessura, raiz Plasma *keyhole* e enchimento PTA-P [11]

A liga metálica em pó para PTA-P de mesma composição química dos tubos não estava disponível no mercado quando do início do trabalho de [11]. Assim, foi utilizado para os desenvolvimentos o pó de Inconel 625. Foi realizada pesquisa no mercado, resultando no desenvolvimento de um fornecedor para o pó de mesma composição que o substrato. Atividade similar é executada atualmente pela equipe do LABSOLDA para projeto conjunto com empresa multinacional de geração de energia, na área de ligas resistentes à cavitação.

Os tubos soldados foram submetidos a ensaios mecânicos, e o procedimento foi qualificado. A vantagem que pode ser vista nesta aplicação é a redução de passes de solda devida à alta penetração alcançada no primeiro passe, que permite um nariz de grande espessura (menos tempo de preparação de chanfro) e um passe de raiz sem adição de material. O volume do chanfro a ser preenchido, portanto, se reduz. Como diferencial competitivo é obtido aumento de produtividade e redução de consumo de material.

Adiante, no item 2.8, serão apresentados processos híbridos que englobam o PTA-P, também para soldas de união.

Outra aplicação ímpar encontrada foi a *cladding* (por soldagem submarina semimolhada) de reatores de aquecimento de água em usinas nucleares sem os custos da drenagem dos mesmos, com o intuito de se combater trincas por corrosão sob tensão (SCC – Stress Corrosion Cracking) [57, 58]. Além dessa aplicação, em [59] é mencionado potencial de uso em construção de plataformas *offshore*. A aplicação de soldagem PTA-P submarina semimolhada (*dry-spot-welding*, apenas o arco e a poça se encontram isolados da água dentro de uma câmara de exclusão acoplada à tocha [58, 59]), em testes à profundidade simulada de 24 m permitiu cordões de solda aceitáveis e tensões residuais compressivas (verificadas por difração de raio-x), que aumentam a resistência da camada à corrosão sob tensão. Isto acontece como consequência da maior

perda de calor do cordão solidificado para a água em relação ao que flui para o interior da peça, como mostra esquematicamente a Figura 2.9.

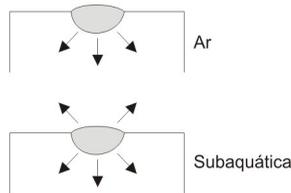


Figura 2.9. Representação esquemática da intensidade e direção de transporte de calor em soldagem ao ar e subaquática [57]

2.4. Componentes de um sistema PTA-P

O processo PTA-P se permite explicar por suas partes constituintes. A fonte calorífica utilizada no processo é um plasma térmico, ou seja, um gás caracterizado por estar pelo menos 1% ionizado (estado no qual a energia fornecida ao gás dissociou gases moleculares e então, como para gases monoatômicos, quebrou os átomos em íons positivos e elétrons negativos [11]), com temperaturas maiores que aprox. 7200° C e com boa condutividade térmica [27]. (Nos processos de soldagem a arco o plasma assume um perfil de temperaturas consideravelmente mais altas, para o qual se atribuem diferentes valores de temperatura média, por exemplo, aprox. 16700° C [27, 28].)

Para controlar essa energia, adequando-a ao processo PTA-P, é necessária uma fonte de corrente para o arco principal e uma fonte de corrente para o arco piloto (com ignitor de alta frequência para sua ignição) e uma tocha de soldagem refrigerada. Para viabilizar a adição de material, é necessário um aparato para armazenagem e alimentação do pó, como mostra a Figura 2.10, além dos gases do processo e seus respectivos reguladores.



Figura 2.10. Esquema de um equipamento para soldagem PTA-P no modo automático

Exemplos da distribuição da energia gerada no processo e absorvida pelos diversos componentes envolvidos podem ser vistos na Tabela 2.5. Naturalmente, estes valores são indicativos e podem variar com parâmetros, tipos de gás, variantes de processo, fatores construtivos e materiais.

Nenhuma fonte da literatura averiguada menciona um sistema de medição de vazão mássica de pó, para quaisquer finalidades (por exemplo, controle da vazão, registro de consumo, cálculo do rendimento de deposição). O presente projeto tem como uma das metas gerar conhecimento nessa direção.

Tabela 2.5. Distribuição de absorção da potência gerada

Componente	Potência absorvida (de um total de 5 a 7 kW fornecidos pela fonte)
Peça	60 % a 65 % [44]
	aprox. 65 % [16]
	60 % a 80 % [40]
Pó	10 % a 15 % [44]
	aprox. 12 % [16]
Água de refrigeração	10 % a 20 % [44]
	aprox. 15 % [16]
	10% a 15 % [40]
Atmosfera circundante	10 % a 20 % [44]

2.4.1. Tocha

Devido à variedade de aplicações industriais do plasma, não há um desenho universal de tocha que atenda aos os requisitos de todas ao mesmo tempo. Uma tocha plasma industrial, que é um aparato eletroquímico e térmico capaz de transformar energia elétrica em energia térmica, deve ter flexibilidade, faixa de operação aceitável para cada situação, vida útil satisfatória do eletrodo e, para potências fornecidas ao arco de até 60 kW (caso do PTA-P) uma perda por refrigeração não maior que 50 % [12]. Em [16] são citadas perdas máximas de cerca de 20 % para o sistema de refrigeração, e que a finalidade essencial do projeto da tocha é produzir um arco estável e perfeitamente centralizado. Como exemplos de aplicações industriais se têm: siderurgia, tratamento de lixo, corte e soldagem [12].

Os fundamentos construtivos das tochas PTA-P devem, portanto satisfazer os requisitos que tornem a aplicação industrial do processo técnica e economicamente viável e competitiva. Uma das questões a serem vistas é a alimentação de material. A injeção de pó ao arco é uma das dificuldades do PTA-P. A distribuição das partículas coaxialmente ao arco, ou através de orifícios concêntricos ao arco, em um ângulo determinado, resulta em limitação da granulometria utilizável e reduz a robustez do processo, segundo [22]. É válido ter em mente que esta afirmação está contida num trabalho que fomenta outra forma de injeção do pó, através do eixo central da tocha. A alimentação de pó ao arco é,

de fato, um fator a ser cuidadosamente considerado, porém, com a evolução do processo e da fabricação dos pó, as limitações estão dentro de faixas aceitáveis industrialmente.

O tipo de injeção afeta a forma do arco. [17, 30, 31] sugerem que o arco é cilíndrico. Em [9] relata-se que o arco, originalmente cilíndrico, passa a ter forma de um cone truncado, quando os jatos de gás de arraste se convergem antes da peça. Além disso, em [1] é introduzido o conceito de ponto focal da injeção de pó, que é a localização na qual diversos jatos de injeção de material se encontram, sob o bico constritor, independentemente do tipo de tocha. Quanto a essa característica, as tochas podem ser classificadas em três tipos: injeção externa, injeção interna e injeção central de pó.

A injeção externa de pó é a mais difundida comercialmente. Ela se caracteriza pelo fato de os orifícios injetores se encontrarem na superfície inferior do bico constritor. Dessa maneira, o material aportado viaja por determinado tempo fora do arco até adentrar o mesmo. O ponto focal será determinado pelo ângulo dos orifícios injetores em relação ao eixo do arco elétrico e pela distância dos primeiros ao segundo.

Na injeção externa de pó são sugeridas em [10] duas variações quanto ao ponto focal (ponto de cruzamento dos jatos de pó na coluna do arco). O trabalho trata de deposição de partículas duras (carbonetos, cerâmicas) em matriz metálica. A primeira versão prevê um projeto de tocha (ângulo de injeção) no qual o ponto focal do pó fica acima da poça de fusão, a cerca de meia distância do bico constritor. Ela é chamada *co-deposição*, pois há alimentação conjunta de partículas duras e pó da matriz metálica. Para o caso de *injeção de partículas*, somente as partículas duras são alimentadas e a matriz metálica é o próprio substrato. Nesta variação a tocha é projetada e posicionada de modo a focalizar o pó na superfície do substrato.

Na mesma linha de raciocínio, é apresentada em [60] a patente de um método de soldagem PTA-P, o qual nada mais é do que uma combinação geométrica entre o ângulo dos canais de injeção em relação ao eixo da tocha e a DBP. Esta invenção preconiza que, para soldas de união, onde o material de aporte é similar ao das peças, o ponto focal de injeção de pó deve estar abaixo da superfície das peças, ou seja, a distância focal deve ser maior que a DBP. Tem-se, entretanto, a ressalva de que a poça de fusão tenha largura suficiente para que os jatos de pó atinjam a peça ainda dentro do banho líquido, de modo que o pó incidente realmente se incorpore a ele. De outro modo, se o ponto focal for acima da superfície, como deve ser em revestimentos, a maior parte da energia do arco é consumida para fundir o pó, reduzindo a parcela de

calor transferida à peça e a fusão da mesma. O princípio, além de talvez não representar uma inovação tecnológica que justifique uma patente, vai de encontro ao exemplo de aplicação descrito em [11], união de topo de tubos de parede espessa, no qual se utilizou injeção interna, com ponto focal inerentemente acima da superfície da peça.

Diaz [9] também investigou o ângulo dos canais injetores, mas em relação à superfície inferior do bico constritor (Figura 2.11). Um ângulo de 30° resultou em partículas não fundidas e falta de fusão nas laterais do cordão, o que não ocorreu para 60°. No último caso, o gás de arraste incide diretamente sobre a poça (maior distância focal, igualada à DBP), deslocando-a para as laterais e causando melhor fusão nestes pontos. O autor menciona resfriamento da poça pelo gás de arraste, o que, neste caso, contribuiria para maior penetração nas laterais do cordão. Outra hipótese seria a maior densidade de corrente nas laterais, causando também maior convecção, pois de fato há um achatamento do arco na direção transversal.

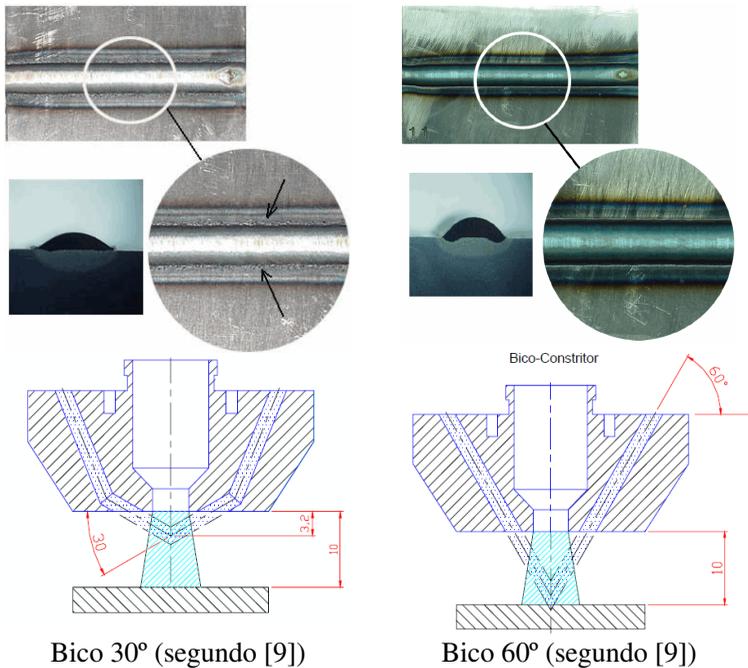


Figura 2.11. Efeito do ângulo dos canais de injeção de pó em relação ao bico constritor [9]

No mesmo trabalho foi verificado que o ângulo de 60° , propicia menor espessura da ZTA, apesar da maior penetração. Uma razão para isso poderia ser um maior valor de tensão do arco para 30° . Mas a diferença de tensão entre os dois ângulos não se mostrou significativa (cerca de 0,5 V para condições normais de deposição). Uma hipótese seria o fato de que o pó incidente na poça pelos canais de 60° apresentam menor temperatura e, assim retira mais calor da poça de fusão. Já no caso do ângulo de 30° , as partículas permanecem mais tempo no arco e chegam à poça mais quentes. O item 2.5 aborda mais detalhadamente a transmissão de calor da poça ao pó.

As desvantagens atribuídas à injeção externa são:

- As partículas entram no arco fora da tocha (no ponto focal abaixo do bico constritor), o que diminui o tempo delas no plasma, e causa não fusão ou fusão insuficiente das maiores. A conseqüente maior demanda de energia de soldagem resulta em maior diluição [22, 40];
- O gás de arraste não pode ser utilizado ativamente para alterar a eficiência do processo, pois tem baixa influência na pressão do arco e sua constrição [22];
- Maior desperdício de pó [40];
- Perturbações individuais nos canais de pó podem causar desvio do arco e inconsistências no depósito [22, 40].

Como vantagens, os mesmo trabalhos citam alta taxa de fusão (para grãos de até $100\ \mu\text{m}$) e baixo desgaste da tocha [22], maior simplicidade e confiabilidade em termos de contaminação dos canais [40].

Há variações quanto ao número de orifícios injetores nos modelos comerciais. O LABSOLDA vem realizando ensaios com dois e quatro orifícios. No caso de dois, Diaz [9] estudou a influência do posicionamento dos orifícios em relação ao deslocamento da pistola. Chegou à conclusão que o posicionamento longitudinal dos orifícios injetores em relação ao cordão apresenta melhor acabamento (acredita-se que pela menor suscetibilidade a variações nas vazões de pó e de gás de arraste) e adota esta configuração para o restante do trabalho, apesar de penetração não uniforme, como se vê na Figura 2.12.

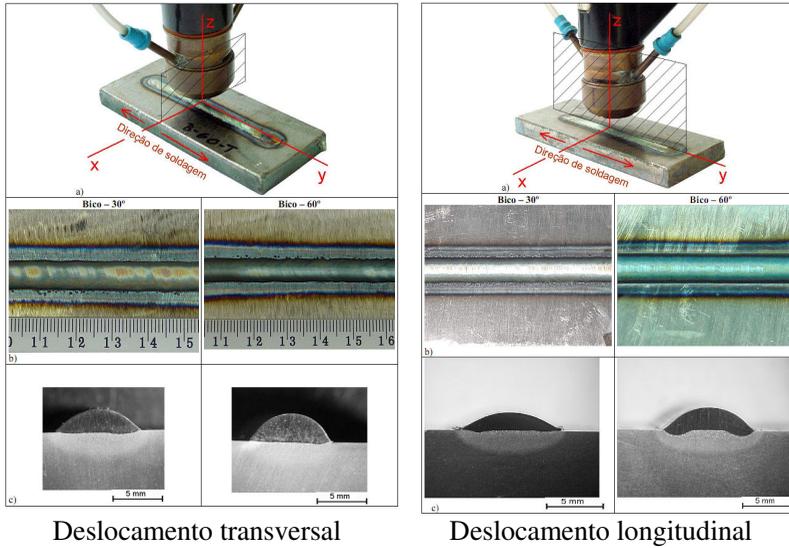


Figura 2.12. Orifícios injetores longitudinais ao deslocamento da pistola [9]

Aplicações com apenas um orifício também foram realizados em alguns trabalhos [9, 19, 29, 61, 62], assim como também seis orifícios [20]. Em [63] apresenta-se uma tocha com seis orifícios injetores, de cujo modelo o LABSOLDA dispõe de uma unidade com quatro furos. A alimentação é concêntrica ao arco elétrico para fornecer um comportamento da tocha independente da direção, como justifica o fabricante. De fato, para o caso de operações manuais sobre peças de geometria heterogênea e de grandes dimensões, a independência da injeção de material em relação à direção da soldagem é uma característica interessante, pois o soldador tende a alterar o posicionamento relativo tocha / peça, mesmo em pequena escala, ao longo do curso da solda.

Uma variação de tocha com injeção externa foi utilizada em [59] para soldas submarinas molhadas, com uma câmara de exclusão de água constantemente pressionada contra a peça por uma mola. Na extremidade inferior da câmara há uma “saia”, feita de malha metálica, que é permeável ao gás que a atravessa e sai, e impermeável à água. A representação desta tocha, Figura 2.13, foi encontrada, no entanto, somente em [64], com sua variação para adição de arame.

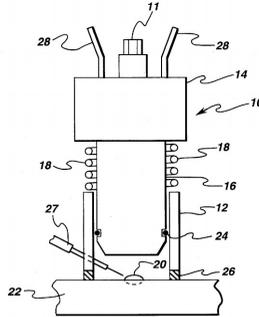


Figura 2.13. Tocha Plasma para soldas submarinas molhadas (versão para alimentação de arame) (partes fundamentais: 12 - câmara de exclusão; 18 - mola de compressão; 24 - anel de vedação; 26 - malha metálica [64])

Outra variação, mostrada na Figura 2.14, implementou um raio de curvatura nos canais de injeção e melhorias na fabricação, obtendo menor rugosidade interna. Estas iniciativas objetivaram melhores condições de injeção do pó e menor desgaste das paredes dos canais [43]. Vale mencionar que este trabalho abordou HPTA, com vazões de pó de 12 kg/h a 15kg/h.



Figura 2.14. Bico constritor e canais de injeção de pó [43]

Em [63] se relata uma inovação em projetos de tocha plasma. Foram implementados dois circuitos de refrigeração, um para o eletrodo e outro para o bico constritor, independentes. Segundo o fabricante, isso permitiu reduzir o tamanho da tocha, para capacidades maiores e maior tempo de vida dos componentes, ao mesmo tempo em que se evita a corrosão eletroquímica dentro da tocha. Além disso, as paredes internas

dos canais de injeção de pó não alcançam temperaturas que poderiam alterar as condições da superfície e perturbar o fluxo das partículas transportadas. Projeto similar é apresentado em [65], com adaptação para soldagem na posição vertical. Esta tocha será mais bem detalhada no item 5.5.5.

A injeção interna é realizada através de um jato anular, coaxial ao arco [22, 35, 40]. O projeto deste tipo de tocha prevê, portanto, além do bico constritor e bocal do gás de proteção, também o bocal focalizador [40]. São encontradas aplicações deste tipo de tocha em [11, 13, 14, 16]. Neste caso, o pó é alimentado diretamente na região mais quente do plasma e é acelerado à peça por ele [40]. Portanto, partículas maiores que as permitidas para injeção externa são fundidas (até 200 μm) [22, 23, 35]. Os fluxos do gás de plasma e do gás de arraste se encontram ainda dentro da tocha. Desta forma, a manipulação da vazão de ambos em conjunto ou separadamente pode ser utilizada para atuar na eficiência térmica do processo e na diluição [22]. Uma tocha com alimentação interna é mostrada esquematicamente na Figura 2.15.

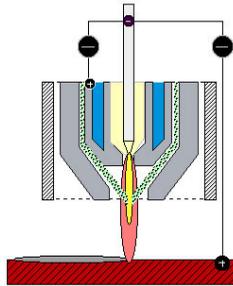


Figura 2.15. Tocha PTA-P com injeção interna de pó [16]

Pavlenko [35], considerando uma tocha com alimentação interna, simulou matematicamente o movimento das partículas e seu aquecimento a partir de sua imersão no arco. Suas conclusões quanto ao comportamento térmico serão discutidas no item 2.5. Neste ponto se faz alusão aos seus resultados quanto à trajetória das partículas, que é afetada grandemente pelo projeto da tocha. Como mostra a Figura 2.16, partículas maiores sofrem menor influência do jato axial do plasma em sua trajetória desde o ponto de injeção até a peça. Ou seja, essas partículas tendem mais a manter seu movimento no ângulo de injeção. Para ângulos maiores, (p. ex. 70°, na figura), partículas tendem a atravessar o arco e colidir com a peça fora da poça, ou mesmo, no caso desse tipo de tocha, colidir

com a parede interna do bocal focalizador e formar uma gota de grandes dimensões, entupindo o canal [35]. Dessa maneira, ângulos mais agudos seriam mais recomendados, principalmente para maiores granulometrias da liga aportada.

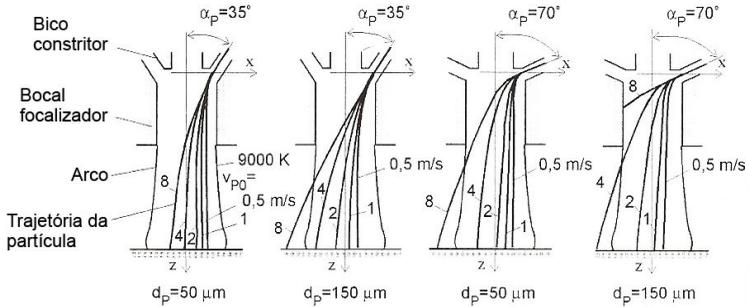


Figura 2.16. Trajetória das partículas (V_{p0} = velocidade das partículas no ponto de injeção) [35]

Colisões nos canais de pó internos à tocha causam irregularidades nas trajetórias das partículas [12] e abrasão dos canais, principalmente no caso de partículas de elevada dureza [22]. O sistema de injeção central de pó possibilita a solução de tais problemas [22]. Este trabalho atribui também maior taxa de fusão e faixa granulométrica (até $300 \mu\text{m}$) passível de ser adequadamente fundida, aumentando a robustez do processo (menor sensibilidade a heterogeneidades de diâmetro nos pó comerciais, fato este que é comum) em relação às injeções interna e externa. A Figura 2.17 mostra em corte o conceito da tocha para injeção central de pó. Ao invés de um eletrodo cilíndrico de tungstênio, se observa um tubo de cobre com uma ponteira tubular de tungstênio brasada em sua ponta, através do qual o pó flui. Neste conceito, o gás de plasma passa a também arrastar o pó e o gás que seria o de arraste no caso de injeção interna, passa a ter como função auxiliar no direcionamento do fluxo de pó. O gás chamado adicional é utilizado para direcionamento do fluxo assim que o fluido pó/gás de plasma sai do eletrodo tubular [22].

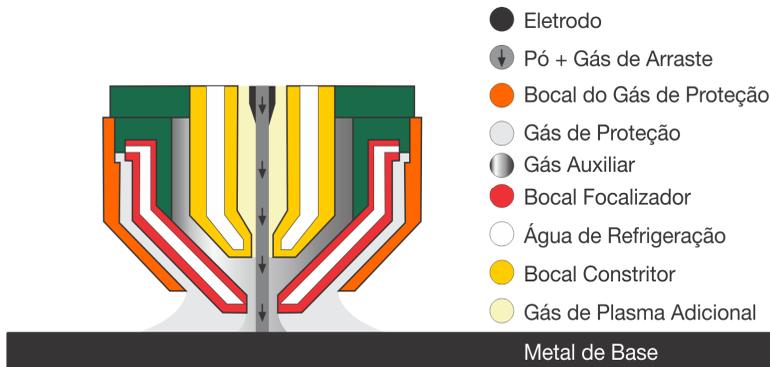


Figura 2.17. Tocha PTA-P com injeção central de pó (adaptado de [22])

Em [40] cita-se que ainda não havia aplicação prática para esta tocha (à época da publicação) e um dos problemas é a alta complexidade de construção da tocha. Em ensaios práticos de [22] surgiram dificuldades no processo. Primeiramente, o cátodo do arco principal passou a ser o bico constritor de cobre, evitando assim o sobreaquecimento da ponteira de tungstênio e sua contaminação por partículas que viessem a se fundir em sua proximidade. A raiz do arco, sobre o bico constritor, se mostrou errática, fazendo com que a regulação dos gases fosse deveras crítica para o bom funcionamento do processo. Principalmente o gás de plasma adicional (*Zusatzgas*), que constringe o fluxo de pó, exigiu substancial atenção. A estabilidade do arco foi relacionada à regularidade do oscilograma de tensão do arco principal. Depósitos de ligas de Ni mostraram melhores resultados que ligas à base de Co e pós atomizados em água foram problemáticos. A vantagem buscada foi alcançada (sob as condições restritas mencionadas), pois granulometrias entre 300 μm e 355 μm puderam ser soldadas.

Além dos tipos de injeção de pó citados, há uma versão na qual o pó é transportado juntamente ao gás de proteção [66, 67]. As vantagens enumeradas em [66] são: menor consumo de gás, pois não se utilizam os outros fluxos para transportar o pó; proteção mais eficiente, pois o pó em suspensão no gás de proteção age como um filtro poroso (tipo *gas lens*), tornando o fluxo rígido, homogêneo e laminar; menor tendência ao entupimento na saída do pó, pois este sai da tocha em uma posição mais afastada da coluna do arco, e menor tamanho da tocha. Os dois últimos fatores, de acordo com experiência do LABSOLDA em compa-

ração com injeção interna, podem ser consistentes. Porém, se observa possibilidade de limitação da capacidade de fusão do pó e alto desperdício por partículas não fundidas. As desvantagens das outras versões (maior consumo de gás, maior número de bocais, maior número de linhas de gás, entupimento, menor eficácia do gás de proteção, mencionadas em [66]) podem ser solucionadas via parâmetros do processo. A Figura 2.18 mostra o esquema de uma tocha com injeção de pó pelo gás de proteção, onde as diferenças chave são a região anelar acima do bico constritor, que distribui o fluido pó/gás de proteção e as ranhuras no bico, até o início do cone do mesmo. Uma sugestão do autor é a possibilidade de se adicionar pó pelo gás de proteção no processo MIG, aumentando a produtividade e melhorando a qualidade do depósito (talvez metalurgicamente, por refino microestrutural).

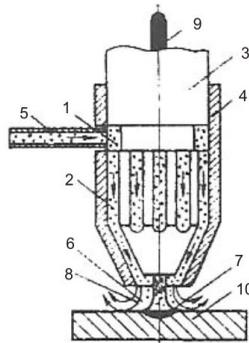


Figura 2.18. Tocha PTA-P modificada, com injeção de pó pelo gás de proteção (1- cavidade anelar de distribuição do pó; 2- canais de transporte; 3- corpo do ânodo; 4- bocal do gás de proteção; 5- tubo de transporte do pó e gás de proteção; 6- jato de pó; 7- poça de fusão; 8- gás de proteção; 9- eletrodo de tungstênio; 10- substrato) [66]

Em [24], que aborda revestimentos por soldagem com pseudoligas (partículas de alta dureza em uma matriz metálica) como material de aporte, é apresentada a tocha ilustrada na Figura 2.19. Nela, o material da matriz é alimentado em forma de arame através do bico constritor e as partículas duras, através do bocal do gás de proteção. Maiores detalhes são comentados no item 2.8. Quanto à tocha, a informação de inte-

resse neste ponto é que a refrigeração do bocal do gás de proteção eliminou aderência de partículas sobre sua superfície. De fato, também em [13, 37] se encontram tochas com injeção interna e refrigeração do bocal do gás de proteção.

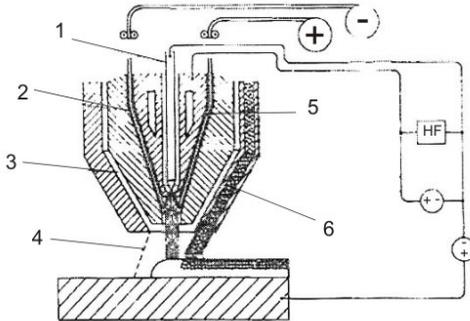


Figura 2.19. Tocha para deposição por soldagem Plasma de pseudo ligas (1- eletrodo de tungstênio; 2- bocal de arame; 3 -gás de proteção; 4- cortina de gás de proteção; 5- material de adição em arame; 6- material de adição em pó (partículas duras) [24]

Seguindo uma das tendências atuais, que está presente em várias áreas da engenharia, foram realizados em [15, 68] modelamento e simulação do arco elétrico e tocha de soldagem para fins de projeto da mesma. As justificativas para o avanço nessa linha são que o desenvolvimento de tochas por protótipos tem alto custo, há pouco ganho em conhecimento [15] e os novos sistemas de simulação adquiriram facilidade de operação, compatibilidade com programas CAD, interatividade com modelos de outros fenômenos presentes (escoamento multifásico, turbulência, radiação) e maior estabilidade [68]. Além disso, medições na região do arco são complexas [15]. A Figura 2.20 mostra uma simulação realizada para definir o design mais apropriado de bocal de gás de proteção na soldagem PTA-P. Segundo os desenvolvedores, o resultado foi aplicado na prática.

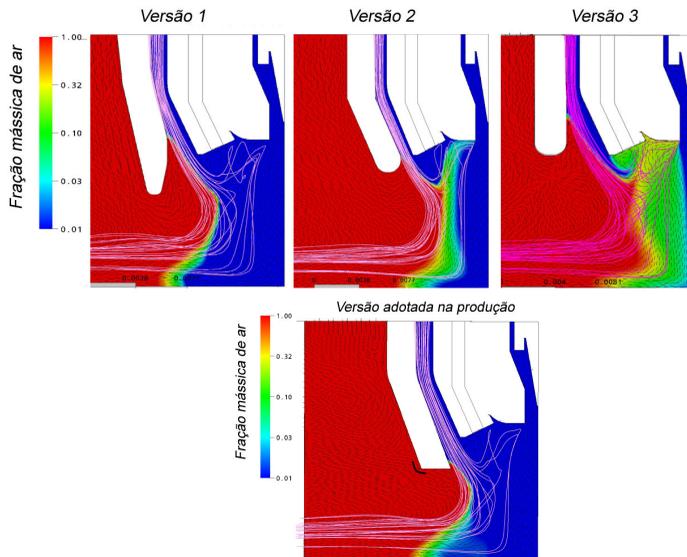


Figura 2.20. Simulação dos fluxos dos gases, para definição de uma geometria do bocal de proteção com eficiência otimizada [15, 69]

Em relação ao eletrodo utilizado, há certa controvérsia entre os autores. Apesar de não se mencionarem as razões técnicas, diferentes tipos de eletrodo de tungstênio são aplicados, quanto ao óxido presente em sua composição. Um eletrodo dopado com óxido de Cério foi utilizado em [1], mas o mais citado é o óxido de Tório [14, 16, 17, 70].

2.4.2. Alimentador de Pó (ADP)

O alimentador de pó (designado no presente texto por ADP) é um componente fundamental nos equipamentos para o processo PTA-P. Ele é responsável pela dosagem volumétrica da liga metálica em pó a ser injetada no arco, através da tocha de soldagem e seu comportamento determina o grau de homogeneidade e repetitividade da alimentação de pó e, conseqüentemente, é fator de importância para a qualidade da solda. Apesar de existirem no mercado vários princípios construtivos disponíveis, a literatura especializada em soldagem não aborda profundamente as características dos modelos usados nas pesquisas. As descrições fornecidas limitam-se a algumas constantes como o fato de a maioria dos equipamentos terem o ADP acima da tocha, sendo a maioria das

aplicações na posição plana, e especificações quanto à forma e granulometria requeridas, sem citar o princípio de funcionamento.

Gomide estratifica, em [71], os transportadores de sólidos encontrados industrialmente em dois tipos gerais: volumétricos e gravimétricos. Os dispositivos volumétricos trabalham com uma vazão em volume constante, enquanto os gravimétricos, de construção mais complicada, mantém a vazão mássica constante. O segundo tipo é utilizado quando há grandes variações de granulometria, umidade e grau de compactação do sólido alimentado. No caso do PTA-P são utilizados os dispositivos volumétricos para a dosagem. Como exemplos desse tipo, existem os transportadores helicoidais (ou fusos transportadores), válvulas rotativas, mesa dosadora e válvulas gaveta. O mesmo livro também divide o Transporte Pneumático em direto (no qual o pó passa através de um ventilador que impele o fluido de arraste) e indireto (o pó não passa por um ventilador). Como será visto a seguir, no subitem 2.4.2.1, o transporte pneumático é uma etapa da Fluidização. Como no processo PTA-P o pó deve ser carregado até a tocha, transporte pneumático do tipo indireto é utilizado.

Uma das dificuldades encontradas na alimentação de pó é sua compactação, segregação de partículas mais densas (pós não pré ligados ou pseudo-ligas) e baixa escoabilidade (conceito explicado no item 2.12). Em [37] foi utilizado um ADP com dispositivo de vibração provavelmente para sanar tais problemas. Este modelo possui um silo com capacidade para 3,0 kg e limita a faixa de granulometria do pó entre 325 mesh (45 μm) e 80 mesh (180 μm) para funcionamento adequado. A representação esquemática do sistema em [39] mostra o silo do ADP sendo pressurizado e ausência de gás de arraste. De fato, alguns autores relatam também vazões de gás de arraste relativamente baixas. Isso provavelmente está atrelado ao fato de que os ADPs estão posicionados acima do nível da tocha e a solda é na posição plana, ou seja, a gravidade age a favor da injeção do pó. O modelo comercial aplicado em [11] possui sistema de aquecimento do silo, que tem capacidade de 10 kg, provavelmente para evitar a umidificação / desumidificar o pó. A faixa de operação é 0,5 kg/h a 5,0 kg/h e parece ser do tipo válvula rotativa.

Dolles [20] usou um ADP comercial, do tipo mesa dosadora modificado, com faixa granulométrica de 5 μm a 200 μm e capacidade de alimentação de 0,1 kg/h (1,7 g/min) a 18 kg/h (300 g/min). O modelo pode ser visto na Figura 2.21. O mesmo tipo de ADP é divulgado em [72], com faixa de alimentação de 0,1 g/min até 200,0 g/min, com capacidade do silo de 0,3 l, 1,5 l e 5,0 l. A discriminação em unidade de volume é considerada mais adequada que em massa, devido às diferen-

tes densidades de pós que podem ser usados. Além disso, se oferece a opção de mantas térmicas para pré-aquecer o pó (sem mencionar isto teria efeito na taxa de fusão ou se seria apenas para desumidificar).

Nota-se o agitador central, que visa evitar segregação e compactação do pó [20, 72]. Neste caso, a dosagem de pó é realizada pela utilização de diferentes geometrias de discos e pela regulação da sua rotação. O pó é coletado na base do silo e entra no fluxo de gás de arraste na outra extremidade do diâmetro (chamada em [72] de unidade de sucção). Através de mangueiras anti-estáticas, o pó é conduzido à tocha de soldagem [72].

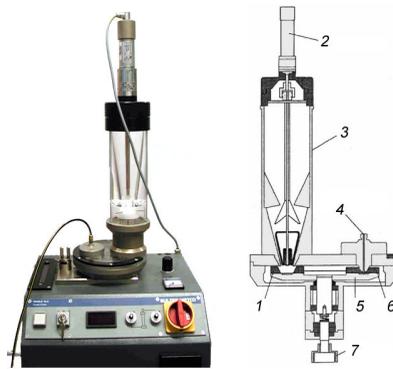


Figura 2.21. ADP tipo mesa dosadora modificado em [20] (1- coleta de pó pelo disco; 2- motor para o agitador; 3- silo armazenador; 4- flange para mangueira de saída de pó; 5- disco; 6- sucção do pó; 7- motor da mesa giratória)

Uma desvantagem deste tipo é a dificuldade de desmontagem para limpeza necessária em trocas de pó [72].

O ADP descrito em [14] tem um silo para 10,0 kg de pó metálico. O princípio de funcionamento não é explanado, mas a faixa de operação é de 0 a 18,0 kg/h (300,0 g/min) e faixa granulométrica de 25 μm a 500 μm , sendo esta a mais larga encontrada. O conjunto eletromecânico de atuação é capaz de obedecer ao comando de uma central de controle, realizando, por exemplo, rampas e sincronização com outros componentes do sistema.

O ADP do tipo fuso é comum na literatura. Em artigos e bancos de dados de patentes são encontradas diversas variações, como, por exemplo, em [9, 37, 61, 73, 74]. Como se vê na Figura 2.22, um fuso é

acionado por um motor, deslocando um volume de pó até a queda na linha de transporte. A rotação é, portanto, responsável pela vazão do pó. Existe um gás que pressuriza o silo, que tem a mesma origem do gás que arrasta o pó.

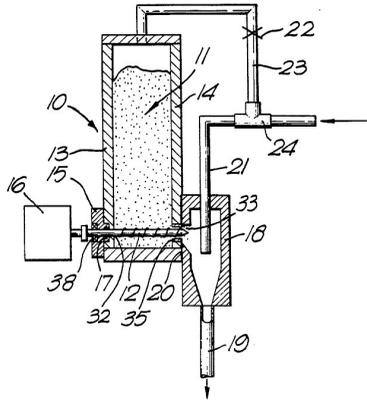


Figura 2.22. ADP tipo fuso [73] (partes fundamentais: 12- fuso transportador; 16- motor de acionamento do fuso; 19- fluxo de pó e gás de arraste; 21- gás de arraste; 23- gás de pressurização do silo)

O mesmo tipo é utilizado por Hallen em [61]. Nesta variação, no entanto, o pó cai sobre o fuso através de um orifício que liga este ao silo. Essa versão baseou o desenvolvimento de Diaz [9]. Num primeiro protótipo, ilustrado em corte na Figura 2.23, este autor utilizou inicialmente um fuso com passo de 10,0 mm e 3,0 mm de espessura do filete. Esta configuração resultou em irregularidades periódicas na saída do pó, que surgiram na mesma freqüência da rotação do motor. A hipótese aventada como causadora disto foi a obstrução pelo filete do canal de queda do pó do silo, durante certo tempo, devida à rotação do fuso. O fuso foi, então, redimensionado, com passo de 4,0 mm e espessura do filete de 0,2 mm, que propiciaram melhores resultados.

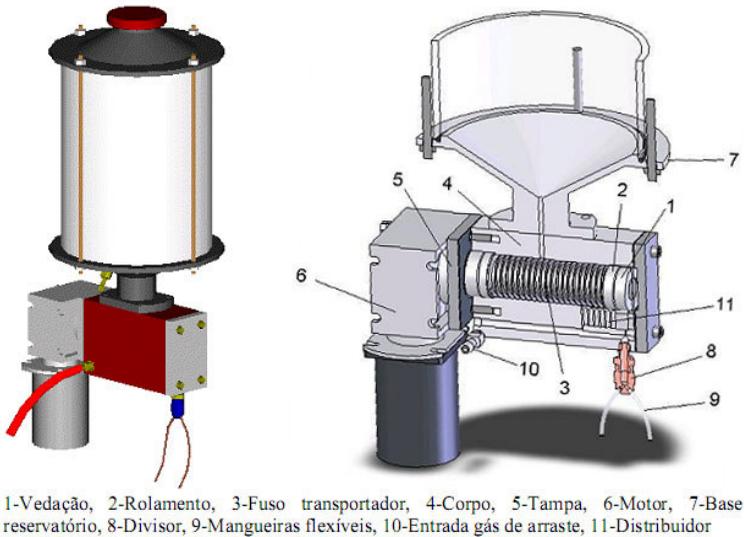


Figura 2.23. Modelo em CAD do ADP desenvolvido em [9]

Em ensaios posteriores, o modelo de [9] foi submetido à análise de desempenho [75]. Foram constatadas ausência de repetitividade e influências significativas da quantidade de pó no silo sobre a taxa de alimentação. Mesmo esses erros não se mostraram tampouco sistemáticos. Um dos ensaios apresentou continuação da alimentação de pó por certo período mesmo com a interrupção da rotação do fuso. Depois de certo tempo ainda dentro deste ensaio, se interrompeu também o gás. Ao insuflar novamente o gás, ainda sem rotação, houve novamente vazão de pó. Isto também não foi explicado. O trabalho sugere, então, alguns princípios construtivos encontrados na literatura para transportadores de sólidos por fusos que poderiam vir a sanar as discontinuidades. No entanto, são de difícil construção e não são apresentados cálculos para projeto. A pergunta que surge, portanto, é: como esses fatores não exerceram influência nos resultados de [9]? Imaginam-se duas hipóteses, quais sejam: a densidade e escoabilidade (explicada no item 2.12) dos pós são diferentes ($4,40 \text{ g/cm}^3$ e $23\text{s}/50\text{g}$ em [9]; $4,60 \text{ g/cm}^3$ e $20\text{s}/50\text{g}$ em [75]) e podem influenciar a dinâmica do pó sendo transportado pelo fuso (cita-se adiante o trabalho [76], que descreve a erraticidade e não linearidade dessa dinâmica); os procedimentos foram definidos em uma faixa de regulação que não transparecia as variações (que poderiam ser

menores inclusive por causa da diferença de densidade). É interessante mencionar que [49] também relata irregularidades na alimentação de pó com o equipamento da Figura 2.23.

Em [74] trata-se de um registro de patente de um ADP do tipo fuso, com uma câmara posterior, na qual o pó é fluidizado. Esta fonte menciona pela primeira vez, em aplicações de alimentação de ligas em pó para revestimento, o conceito de Fluidização (explicado em detalhe no item 2.4.2.1 adiante).

Os problemas atrelados ao transportador tipo fuso são a rotação do pó junto ao fuso, sem que este seja efetivamente alimentado à frente, chamado “*blinding*”, o surgimento de efeitos cíclicos, que tornam a alimentação heterogênea e a compactação (e conseqüente entupimento) no caso de pós muito finos, segundo [73]. Spivakovsky [77] cita ainda desgaste do sistema e alto consumo de potência, devido ao atrito entre pó e o fuso e as paredes internas, e trituração do material. Como em [37], em [73] é sugerida vibração do componente para evitar o entupimento nos canais de alimentação. Numa investigação mais aprofundada, o movimento do pó transportado por um fuso foi observado via Raios X em [76]. O fluxo de pó sofre fenômenos altamente não lineares e depende de uma série de fatores, que, por sua vez, variam também com as condições. Partículas de alta absorção foram injetadas no fluxo de pó em um fuso e seu movimento rastreado via sucessivas radiografias realizadas com vista superior e lateral. As fotos foram então, adequadamente sobrepostas, sincronizando-se o movimento dos filetes e das partículas densas, gerando imagens que traduzem o movimento de pós quando transportados por fusos. Os autores afirmam que há escorregamento de pó sobre os filetes, o que juntamente a turbulências nas bordas dos filetes, resulta numa velocidade média do pó três vezes menor que a do fuso na direção de transmissão. A Figura 2.24 ilustra o movimento das partículas via manipulação das radiografias e a Figura 2.25 mostra a relação do movimento dos filetes e das partículas durante a transmissão. Nota-se, a perturbação da velocidade quando o pó passa pelas bordas dos filetes, por cisalhamento do aglomerado de partículas.

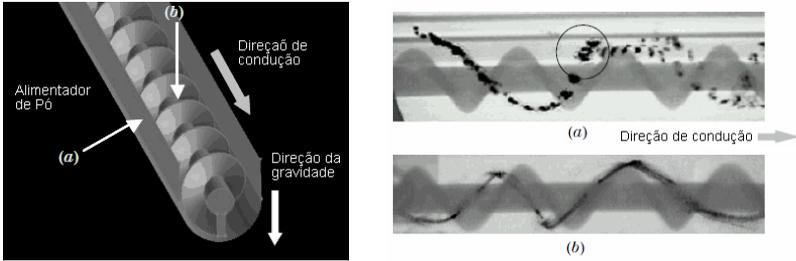


Figura 2.24. Representação esquemática das direções de irradiação do fuso e imagens do movimento das partículas rastreadas, feitas a partir de sobreposição das radiografias [76]

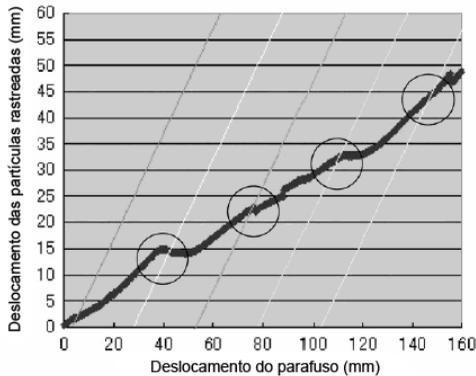


Figura 2.25. Movimento das partículas rastreadas em relação ao movimento dos filetes do fuso [76]

Em [78] os inventores se propõe a evitar problemas advindos da distância entre o dispositivo dosador de pó e a tocha. Deste modo, ele é embutido no próprio corpo da tocha, como esquematizado na Figura 2.26. Sua injeção ao arco se dá exclusivamente por efeito da gravidade. Estão excluídas, portanto, aplicações manuais e fora da posição plana.

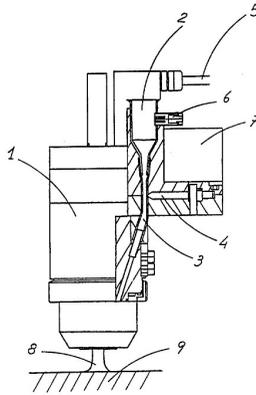


Figura 2.26. ADP embutida no corpo da tocha PTA-P [78] (1- corpo da tocha; 2- reservatório intermediário de pó; 3- canal de queda do pó; 4- válvula de abertura/fechamento do canal de queda; 5- tubo de conexão entre o silo armazenador e o reservatório intermediário; 6- sensor de quantidade de pó; 7- acionamento da válvula 4; 8- arco PTA-P, 9- poça de fusão)

O reservatório possui um sensor, acionado quando o nível de pó cai abaixo de determinado nível, que libera seu preenchimento por outro reservatório maior. A vazão é regulada por uma válvula que estrangula o canal (um tubo flexível) pelo qual o pó cai para o arco. Pretende-se eliminar com este projeto problemas como o *delay* entre o momento da dosagem e a sua efetiva saída na tocha e possíveis acúmulos de pó nas mangueiras, que podem gerar irregularidades na alimentação, causando defeitos no cordão.

A Figura 2.27 mostra o dispositivo de [79, 80, 81], que tem o princípio da válvula rotativa. A rotação do tambor, junto à regulagem do *gap* entre o tambor e a face do canal de queda, determina a vazão de pó metálico que está armazenado em um silo pressurizado. Para cada pó dever ser realizada uma calibração, devido a diferentes propriedades de escoamento. Isto vale também para os outros tipos de ADP.

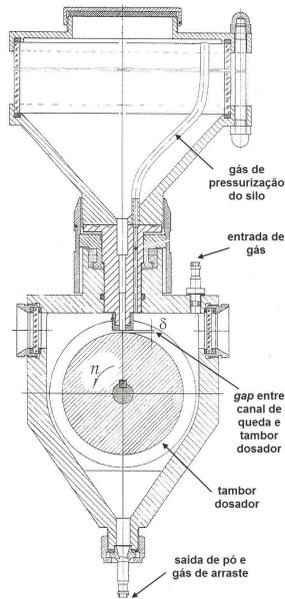


Figura 2.27. ADP do tipo válvula rotativa [80]

A invenção registrada em [60] (Figura 2.28) visa descompactar o pó via jatos de gás pelas aberturas no tubo 4, assim desobstruindo o canal 7. O pó cai no canal 8, é envolto pelo fluxo de gás em alta velocidade (pela redução da área entre o canal 2 e o 9) e é então arrastado até a tocha. O método de regulagem da vazão de pó não é descrito no documento pesquisado.

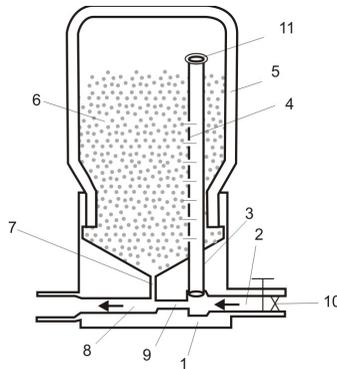


Figura 2.28. ADP com tubo interno e aberturas [60] (partes fundamentais: 3- gás de pressurização do silo; 4- orifícios de descompactação do material em pó; 7- canal de queda do pó; 9- redução de área, aumento da velocidade do gás)

2.4.2.1. Fluidização

Nas pesquisas da literatura referente a aparatos de alimentação de materiais em pó, ou granulados, a técnica de fluidização foi frequentemente mencionada. Trata-se de um processo pelo qual o material sólido em grãos passa a se comportar similarmente a um fluido quando um gás ou líquido é injetado num recipiente que contém o material sólido através sua da superfície inferior [82, 83, 84]. A técnica é utilizada tanto para operações físicas (aquecimento e transporte), como para reações químicas (catálise). Uma justificativa para o uso da fluidização é o alto grau de interação entre o fluido e as partículas, com alta taxa de transferência de calor e massa, além de possibilitar transporte e/ou mistura consistente de sólidos [84]. Tais aplicações se encontram nas indústrias farmacêuticas, petroquímicas, etc [82]. A capacidade de se fluidizar e o comportamento de determinado pó num leito fluidizado depende principalmente dos diâmetros das partículas e sua densidade [82], de modo que há uma classificação, definida no diagrama de Geldart, Figura 2.29, que define quatro tipos de pós [82, 83]. Os grupos A e B têm relativa facilidade de fluidização. O grupo C, por apresentar forças interpartículas relativamente altas, possui difícil fluidização. Neste grupo também se encontram pós de baixa escoabilidade, como explicado adiante, no item 2.12. O grupo D não permite fluidização. O fluido insuflado forma um canal através do material sólido ou o ejeta para cima.

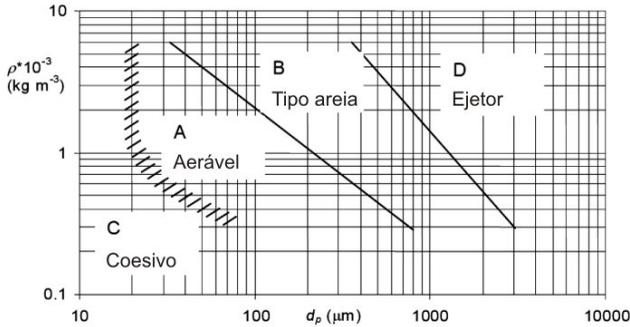


Figura 2.29. Diagrama de Geldart para classificação de partículas [82]

A fluidização pode ser dividida em diferentes regimes de acordo com a velocidade do fluido injetado e as características do pó, segundo a Figura 2.30. No Leito Fixo, as partículas vibram, mas sua altura permanece inalterada. Ao se incrementar a velocidade, se alcança a situação de Mínima Fluidização, na qual a velocidade do fluido resulta em uma força de arraste sobre as partículas que se iguala à força peso sobre as mesmas havendo aumento do espaço entre as partículas [82, 84]. Em [83] este estágio é chamado Leito Expandido. Em seguida se tem o Leito com Bolhas (ou Regime de Bolhas [84]) e, depois, a Fluidização com Pistões (as bolhas alcançam o diâmetro do recipiente). O Leito Turbulento é o próximo regime, no qual a superfície superior do leito se desfaz e as há lacunas e aglomerados de pó de vários tamanhos fluindo para cima. Finalmente, se alcança o Transporte Pneumático (chamado em [83] de Leito Pneumaticamente Mobilizado), no qual surge dispersão homogênea do pó no fluido, escoando homogeneamente o fluido resultante. Este seria o estágio aplicável ao arraste do pó na soldagem PTA-P.

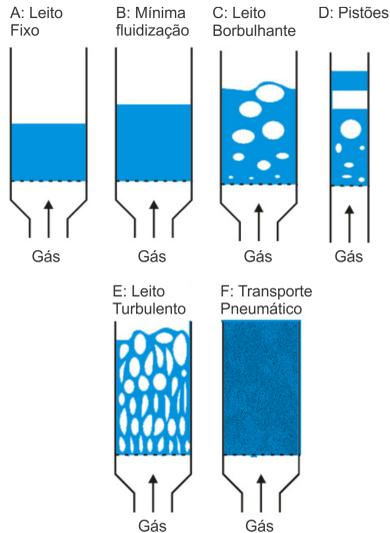


Figura 2.30. Regimes de fluidização, de acordo com a velocidade de injeção do fluido inferior [82]

2.5. Comportamento Térmico e Cinemático do Pó

Algumas propriedades do processo PTA-P e dos resultados obtidos nos revestimentos são influenciados não somente pela composição química do material sendo aportado em pó, mas também pela dinâmica e comportamento térmico deste em sua trajetória após sua ejeção da tocha [1, 30, 31, 41, 85].

Ao adentrar o plasma, o pó será pré-aquecido, fundido e/ou vaporizado. Uma avaliação teórica do transporte do pó e seu comportamento térmico dentro do arco foi realizada em [1, 30, 31, 35] com resultados distintos. Em dependência do procedimento de soldagem, granulometria do pó e projeto da tocha, diferentes quantidades de pó são desviadas de seu trajeto desejado, alcançando ou não a poça de fusão. Alguns autores assumem, entretanto, que todas as partículas alimentadas são efetivamente carregadas pelo plasma até a poça. Não se encontra em [12] uma avaliação quantitativa (mesmo que teórica) do comportamento do pó, como em [1, 30, 35, 85], mas é mencionado que o local de injeção do pó, o estado de turbulência nesse ponto e a quantidade de movimento vetorial das partículas em relação ao jato plasma influenciam a aceleração e aquecimento até a poça sobre o substrato. A distribuição de tama-

nho e velocidade das partículas e as colisões com as paredes do canal de injeção resultam em diferentes velocidades e trajetórias no ponto de injeção. O resultado são diferentes tempos de permanência de partícula no plasma e diferentes evoluções tempo / temperatura ao longo da trajetória.

O ponto de partida para avaliação das características termocinéticas é a observação das propriedades do arco, que, por terem sua medição deveras complexa, são calculadas com condições de contorno [1]. A Figura 2.31 mostra a velocidade do fluxo do plasma, V_{∞} em função da distância radial do ponto em que se quer medi-la e o eixo da coluna de plasma, para as condições do processo assumidas, como na Tabela 2.6 [30], chegando a 90 m/s no eixo central, para 100 A.

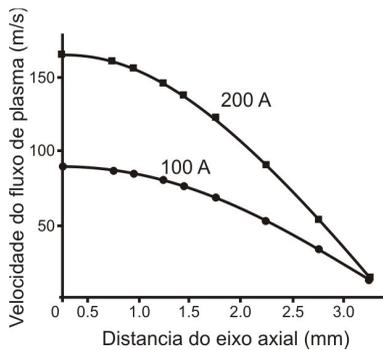


Figura 2.31. Velocidade do Fluido Plasma, V_{∞} , em função da distância do eixo axial da coluna do arco [30]

Tabela 2.6. Condições de soldagem PTA assumidas em [30].

Corrente do arco principal (A)	Tensão (V)	DBP (mm)
100 - 200	28 - 32	15,0
Diâmetro do orifício constritor (mm)	Vazão de gás de plasma (l/min)	Vazão de gás de arraste (l/min)
6,0	0,25	0,4

Em [1] se encontra outro perfil de velocidades para o chamado fluxo do arco, como se vê na Figura 2.32.

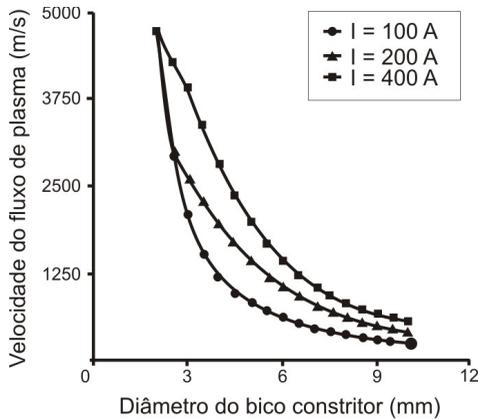


Figura 2.32. Relação entre a velocidade do fluxo do arco, corrente de soldagem e diâmetro do orifício constritor [1].

Apesar de não se apresentarem as condições assumidas para cálculo em [1], nota-se grande discrepância entre os valores de velocidade, por exemplo, para 100 A e diâmetro do orifício constritor de 6,0 mm. Observa-se que os valores de vazão de gás de plasma e vazão de gás de arraste de pó da Tabela 2.6 estão fora da faixa verificada na experiência do LABSOLDA e na literatura. Pavlenko [35] assume em seus cálculos uma velocidade de 160 m/s para o fluxo do plasma, e temperatura de 13500 K (aprox. 13200° C) para este, afirmando, ainda, que velocidades de jato plasma dessa ordem resultam em baixa pressão sobre a poça e baixa penetração.

Em seguida, se avaliou em [30] a força que arrasta o pó, a qual age imediatamente assim que o mesmo é injetado no arco, e que depende da viscosidade do plasma. A viscosidade do plasma, por sua vez, varia com a temperatura, de acordo com a Tabela 2.7 definida para Argônio.

Tabela 2.7. Propriedades físicas do plasma de Ar (ρ_m = densidade, μ = viscosidade) [30].

T (K)	5000	7000	8000	9000	10000
$\rho_m \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$	9,765	6,973	6,094	5,390	4,782
$\mu \times 10^{-4} \text{ Pa} \times \text{s}$	1,840	2,330	2,560	2,770	2,900
T (K)	11000	12000	13000	14000	15000
$\rho_m \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$	4,209	3,627	3,033	2,479	2,035
$\mu \times 10^{-4} \text{ Pa} \times \text{s}$	2,840	2,450	1,810	1,170	0,711

Assume-se, então, que a velocidade inicial das partículas de pó é nula e se calcula a V_p (velocidade das partículas de pó) em dependência da distância axial do ponto de injeção do pó até o ponto em questão ou da distância radial do eixo da coluna do arco até o ponto em questão [30]. Como mostram as Figuras 2.33 e 2.34, a V_p é maior para partículas de menor densidade e menor diâmetro. Em [40] se atribuiu uma velocidade na injeção das partículas de cerca de 1,5 m/s a 2,0 m/s e em [35], 4 m/s. Este último ainda varia a velocidade de injeção (de 0,5 m/s a 8,0 m/s) em sua simulação, para averiguação da influência sobre a trajetória de partículas de diferentes granulometrias. A Figura 2.16, no item 2.4.1 mostra seus resultados, na análise conjunta à do projeto da tocha

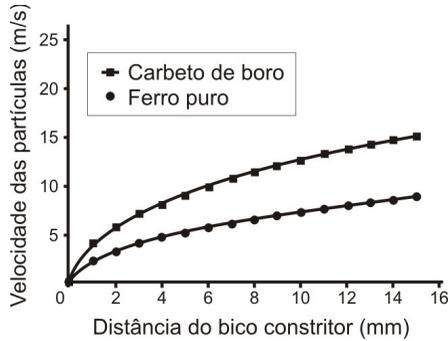


Figura 2.33. Processo de aceleração de partículas de pó de diferentes densidades (Fe e B_4C , de menor densidade), para uma corrente de arco PTA-P de 100 A [30]

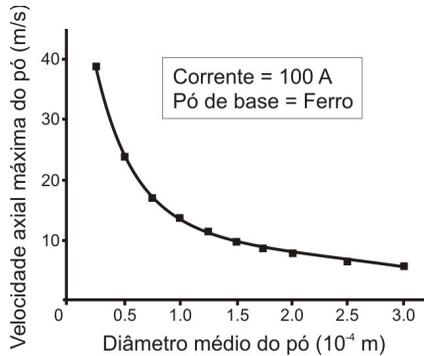


Figura 2.34. Velocidade do pó de Fe com diferentes diâmetros, para uma corrente de 100A [30]

Assim como apresentado na Figura 2.33, a Figura 2.35 mostra os resultados obtidos em [1] para a velocidade do pó dentro do arco em relação à posição das partículas a partir da face inferior do bico constritor (L_b). É apreciável a diferença no nível de grandeza nos valores. Para uma melhor comparação, recomenda-se observar a curva para diâmetro de orifício constritor de 6,0 mm (valor também assumido em [30]).

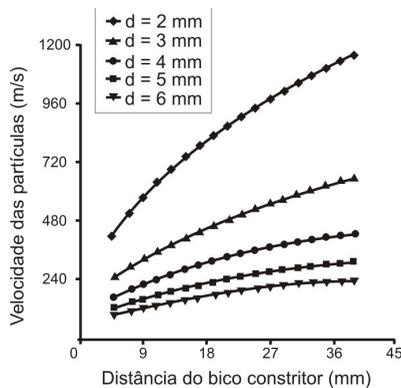


Figura 2.35. Processo de aceleração de partículas de pó, para diferentes diâmetros do orifício constritor (d =diâmetro do orifício constritor) [1]

Já a Figura 2.36 mostra a distribuição radial da velocidade axial das partículas em diferentes correntes de soldagem em decorrência do

perfil de viscosidade. Vale lembrar que o cálculo de V_∞ depende, além da corrente, também de outros parâmetros PTA-P adotados e inseridos nas equações. Na mesma figura é ilustrado o perfil de viscosidade calculado em simulação numérica do processo plasma em [101], com resultados coerentes com [30].

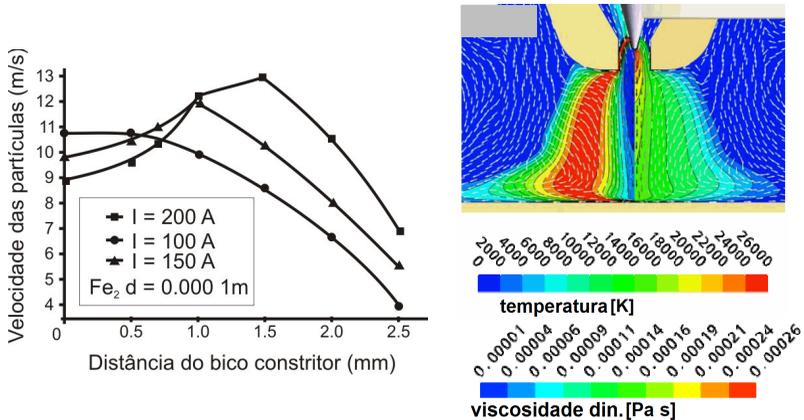


Figura 2.36. Distribuição radial da velocidade axial do pó em diferentes correntes de soldagem, partículas de Fe com diâmetro de $100\ \mu\text{m}$ [30] (à esquerda) e perfil de viscosidade calculado para soldagem plasma [101] (à direita)

Nota-se que velocidade das partículas é substancialmente menor que a velocidade do plasma e que as máximas velocidades daquelas se dão num campo onde a temperatura está na faixa de $9000\ \text{K}$ - $11000\ \text{K}$ (aprox. $8700^\circ\ \text{C}$ e $10700^\circ\ \text{C}$), no qual se tem maior viscosidade do plasma. Ainda segundo [30], para maiores correntes o efeito de vale é mais pronunciado (Figura 2.36). Em termos de influência sobre o processo, o autor menciona que esta distribuição em forma de vale ajuda no pré-aquecimento ou fusão no caso de maiores granulometrias e que, para menores granulometrias, leva à vaporização, quando o pó passa através desse campo. Percebe-se que isto pode ser levado em consideração no projeto de tochas, no que tange ao direcionamento de pós finos para regiões de maior velocidade e menor temperatura e pós grossos para regiões de menor velocidade e maior temperatura.

Para os cálculos teóricos foi assumido em [30] que o plasma é um continuum e que as partículas são esféricas. Em [1], se assume que o arco tem apenas a componente de velocidade axial, e nenhuma radial,

que o pó não foi aquecido ou acelerado até o ponto focal e que a alimentação é igual em ambos os orifícios injetores. Ressalta-se que foi assumida uma condição de alimentação coaxial de pó ao arco (como a que ocorre no tipo de injeção interna) em [30] e injeção externa, com dois orifícios, em [1]. Esta diferença certamente contribuiu para os valores de velocidade desiguais.

Ainda dentro deste aspecto, Pavlenko [35] concluiu que, para partículas entre 100 μm e 200 μm , seu aquecimento não depende da velocidade do jato plasma, uma vez que os efeitos de aumento da eficiência de troca térmica entre o plasma e a partícula e menor tempo de permanência da segunda no primeiro com o aumento da velocidade do plasma se compensam. Segundo a mesma obra, há independência também entre o aquecimento da partícula e as propriedades termofísicas dela, pois a temperatura do plasma é muito maior que a temperatura alcançada pela partícula. O grau de transferência de calor, afinal, depende da diferença $\Delta T = T_{pl} - T_{pó}$. Desta forma, pós de composições diferentes, mas soldados em condições similares, possuiriam a mesma entalpia ao se incorporar à poça de fusão.

A partir dos resultados dos cálculos do comportamento do movimento das partículas de pó, o tempo t_0 de viagem do mesmo (em uma DBP de 15 mm) pôde ser determinado. Como a Figura 2.37 evidencia, a corrente não exerce significativo efeito sobre o transporte de pós à base de Fe pela região central do plasma [31].

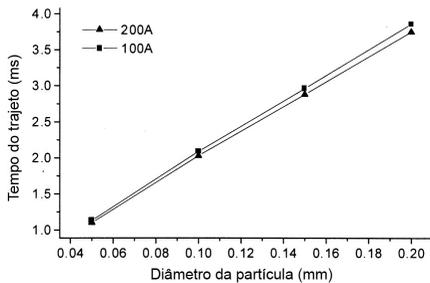


Figura 2.37. Tempo médio de viagem de partículas de liga à base de Fe pela região central do arco plasma [31]

O autor de [31] considerou condições de alta convecção e alta condutividade térmica das partículas para calcular o tempo t_l necessário a elas para alcançar diferentes temperaturas, desde o estado original

sólido e, assim, determinar o estado alcançado pela partícula. Para os seus cálculos ele considerou propriedades do Ar para gás de plasma e de uma liga metálica à base de Fe para o pó, assim como temperaturas máximas de 11000 K (aprox. 10700° C) para 150 A de corrente de soldagem e 15000 K (aprox. 14700° C) para 200 A. As Figura 2.38 e 2.39 mostram o comportamento térmico do pó para as correntes abordadas.

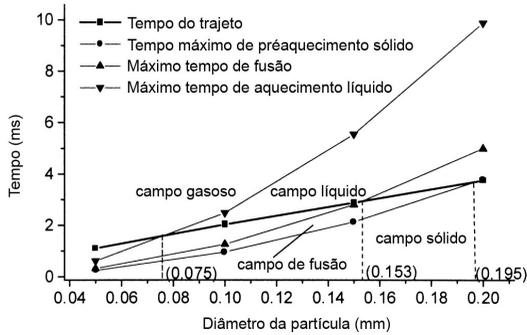


Figura 2.38. Comportamento térmico do pó para corrente de soldagem de 200 A [31]

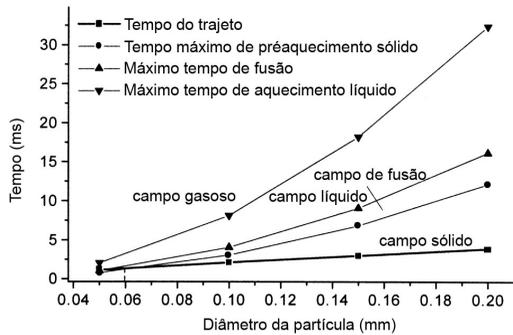


Figura 2.39. Comportamento térmico do pó para corrente de soldagem de 100 A [31]

Observa-se que a utilização de 200 A de corrente do arco principal demandaria uma granulometria de, no mínimo, 75 μm , para evitar perda de material de adição por evaporação na coluna do arco, no caso das condições consideradas. Restaria, então, a condição de completa

fusão do pó para obtenção da composição desejada no cordão de solda, pois se vê que, sob corrente de 100 A, apenas granulometrias abaixo de 60 μm começariam a fundir ainda no arco. O autor coloca possibilidade de refusão para esses casos de fusão insuficiente, mas não especifica o método e condições para isso. Em trabalho posterior [85], o mesmo autor conclui que a maior parcela para fusão completa das partículas vem da poça metálica (condução térmica) quando as primeiras alcançam a segunda, para partículas cerâmicas. Em [34] e [35], inclusive, é citado que a transferência de calor da poça para o pó exerce refrigeração da primeira em certo grau, contribuindo para menor diluição.

Para pós à base de Fe, segundo [85], o aquecimento adicional do pó é ainda maior que para cerâmica, pois aliada à condução térmica, há também o aquecimento vindo de interações com os elétrons do arco, o que não acontece com as cerâmicas (isolantes elétricas). Assim, pó à base de Fe sendo soldado a 100 A seria completamente fundido sobre a poça.

Pavlenko [35] aborda o comportamento do pó na poça metálica, exaltando as vantagens advindas da fusão não completa do mesmo no arco. As partículas não totalmente fundidas retiram calor do metal líquido, que tem sua temperatura média reduzida, e assumem o papel de partículas de resfriamento. Sua superfície se transforma numa frente de cristalização, permitindo estrutura anisotrópica e refinada (teoria também defendida em [47] e verificada em [9], que comparou resultados microestruturais de pó e arame).

As condições de contorno assumidas para os cálculos em [85] são: ausência de excesso de pó, ponto anódico estável, temperatura de 3300 K (aprox. 3000° C) (temperatura de vaporização do Fe) no ponto anódico sobre a poça de fusão, impingimento das partículas na poça somente através do ponto anódico. Ou seja, em soldas reais, as condições são consideravelmente distintas, pois o fluxo de pó é disperso, colidindo com a poça em pontos fora do centro do arco, resultando em menos calor à partícula por efeitos do arco. Da mesma maneira, sob excesso de alimentação de pó para determinada corrente de soldagem há instabilidade do ponto anódico e redução de transferência de calor da poça, talvez até sua anulação.

Na verificação experimental, de volta a [31], partículas de 150 mesh (aprox. 110 μm) originais (antes de ser submetidas ao calor do plasma) apresentaram dendritas finas na superfície. Partículas submetidas a um plasma de 80 A apresentaram coalescimento das dendritas, ainda presentes, indicando a não fusão. Já partículas que passaram por

um plasma de 120 A não apresentaram mais as dendritas, indicando que ao menos a superfície foi fundida.

Apesar de alguns autores concordarem quanto à fusão das partículas antes de chegarem a poça, (em [18], cita-se que o plasma chega a temperaturas de 20000 K (aprox. 19700° C), em [23] de 20000 K a 30000 K (aprox. de 19700° C a 29700° C)), suficientes para fundir o pó antes de ele mergulhar na poça), outros afirmam que o pó chega num estado semi-fundido. Ao absorver calor da poça, se funde então completamente [11, 16, 19, 35, 85]. As características construtivas da tocha quanto à forma de injeção do pó também podem ter influência nesta questão. O ponto de injeção do pó (ou forma de injeção do pó – interna, externa ou central, explicadas no item 2.4.1), implica em um diâmetro máximo de partícula que pode ser fundido [22].

Quanto à importância da velocidade das partículas ao encontrarem a poça, é afirmado em [1] que maiores valores proporcionam maior facilidade para a junção entre o material de base e o aportado, mesmo quando apenas uma fina camada da superfície da peça (condição de “suor”) é fundida. Uma hipótese explicativa para isso, entretanto, não foi fornecida. Pode-se supor que, quanto mais veloz, mais profundamente a partícula penetra na poça, melhor a absorção de calor adicional e menor a sua tendência a não se fundir completamente ou de não se incorporar ao banho metálico.

A distância entre o bico constritor e a peça (DBP) também é importante na busca por alta taxa de fusão e baixa diluição. Este parâmetro, portanto, deve ser escolhido, segundo [1], para que haja absorção de calor suficiente para se alcançar a temperatura de fusão do pó em seu trajeto até a peça, e mínima entrega de calor à mesma. Ao analisar o comportamento térmico do pó, [1] sugere, na Figura 2.40, curvas de calor absorvido em função do diâmetro do orifício constritor da distância da partícula em relação ao ponto focal do pó.

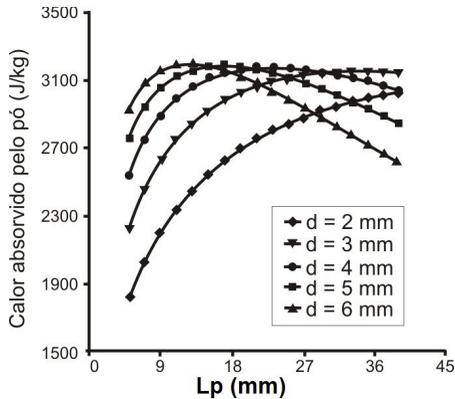


Figura 2.40. Relação entre o calor absorvido pelo pó, diâmetro do orifício constritor e L_p (distância da partícula em relação ao ponto focal do pó) [1]

Pela Figura 2.40, vê-se que o calor absorvido pelo pó em pontos ao longo de L_p (até cerca de 22,5 mm), é menor para menores diâmetros do orifício constritor, devido à maior velocidade das partículas (menor tempo no arco). Assim a sugestão do autor é a utilização de grandes DBPs (acima de aprox. 20 mm), e pequenos diâmetros do orifício constritor, baseando-se no critério de alta taxa de deposição e baixa diluição. O pequeno diâmetro do orifício constritor garantiria maior velocidade das partículas (vide Figura 2.35), o que teria como efeito colateral quantidade insuficiente de calor absorvido pelo pó para sua fusão. Para sanar este inconveniente, uma DBP mais alta é utilizada, garantindo a absorção de calor mínima necessária pelas partículas. O autor chega à conclusão de que, para a mesma corrente e mesma DBP (suficientemente alta), menores diâmetros constritores permitem maior taxa de deposição que maiores diâmetros constritores, mantendo a diluição em níveis similares.

Em dependência das condições de soldagem, partículas de pó metálico adicionado se aquecem no arco acima do ponto de vaporização, formando vapores metálicos, segundo alguns autores. Em [25], Wahl afirma que estes vapores formam depósitos que se condensam na superfície da tocha, sobre os cordões de solda e sobre o metal de base. No caso de revestimento sobre peças de pequenas dimensões ou em bordas angulosas, a maior parte deste vapor passa pelo metal de solda através de cada lado, não gerando grandes depósitos. Por outro lado, no caso de revestimentos de superfícies maiores e planas, esses depósitos de vapo-

res condensados podem alcançar espessuras que venham a gerar problemas. Em peças grandes há ainda o agravante de que maiores correntes são usadas, gerando, portanto, mais vapores. Ainda de acordo com a experiência obtida em [25], depósitos muito espessos de vapores condensados podem gerar defeitos de fusão em soldagem multipasse, e, sobre a tocha, podem gerar restrição do gás de proteção ou deflexão do jato plasma. De acordo com experiência do LABSOLDA, obstrução dos orifícios de injeção de pó acarreta irregularidades na alimentação de material. As seguintes medidas são sugeridas por [25] para se evitar o problema em soldagem de peças de grande superfície:

- Utilizar um design de tocha que resulte em fusão do pó na periferia do arco e não no centro (o que se relaciona ao exposto anteriormente, quanto ao perfil de velocidade das partículas na seção transversal do arco (Figura 2.36));
- Assegurar partículas maiores que $60\ \mu\text{m}$ (limite similar ao colocado em [31], para 200 A de corrente do arco principal);
- Utilizar Ar+H₂ (p. ex. 95%Ar + 5% H₂) como gás de proteção (talvez pelo fato de que o H₂, como redutor químico e apesar de apresentar boa condutividade térmica, resulte em menor quantidade de oxidação, o que geraria, adicionalmente, mais calor e mais vaporização);
- Utilizar a maior DBP possível, de modo que a tocha esteja menos exposta aos vapores metálicos e respingos.

Em [12] a ocorrência de vaporização é dada como certa, devido à grande densidade de calor do plasma (cerca de $10^8\ \text{W/m}^2$). Essa nuvem de vapor modifica a transferência de calor para as partículas e reage com o plasma. As condições resultantes, no entanto, não são explicitadas.

2.6. Diluição

Uma das mais importantes características de um depósito PTA-P, de acordo com os requisitos de qualidade que se têm, é a diluição, uma quantificação da mistura entre o material de base e o material de adição resultante no metal de solda. Uma baixa diluição resulta em maior pureza da composição química do revestimento em relação a contaminações do metal de solda pelo material de base. O valor da diluição depende de parâmetros do processo: vazão de pó (V_{mpo}), corrente de soldagem, velocidade de soldagem (V_s) [18, 23, 35], tecimento [9, 35], vazão de gás de plasma (V_{gpl}), gases e materiais utilizados [18], diâmetro do bico constritor [29], granulometria do pó aportado [35]. O item 2.11 detalha-

rá as referidas influências. A diluição pode ser calculada basicamente por intermédio de dois diferentes métodos.

Primeiramente, o mais utilizado é o método da relação das áreas, no qual se divide a área transversal do material de base fundido pela área transversal total do metal de solda [9, 10, 18, 35, 46, 61], como se vê na Figura 2.41.

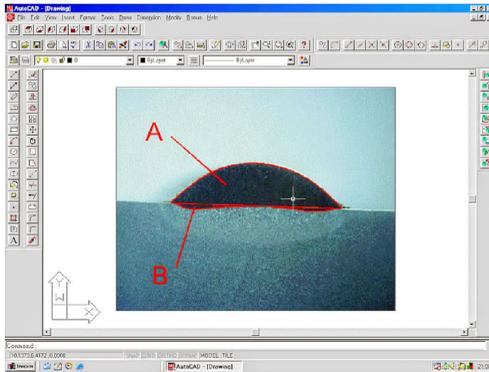


Figura 2.41. Cálculo da diluição pelo método das áreas [9].

O segundo é o método do teor de Fe no revestimento, encontrado em alguns trabalhos da literatura especializada [17, 29, 32, 39, 41, 44, 47]. Neste método, se estabelece uma relação entre o teor de Fe encontrado no revestimento, o teor de Fe original do metal de adição e o teor de Fe original do metal de base. Este método é recomendável para processos que geram baixa diluição e assimetria na geometria do depósito, como é o caso do PTA-P, e é determinado por

$$D (\%) = ((\text{teor de Fe no revestimento} - \text{teor de Fe no metal de adição}) / \text{teor de Fe na base}) \times 100 \quad (\text{eq. 2.1}) [48],$$

sendo que os conteúdos de Fe foram determinados em [48] por EDS.

Um terceiro método, simplificado, é utilizado em [37], no qual se calcula a diluição pela profundidade de penetração dividida pela espessura total do metal de solda. Este método, no entanto, parece não recomendável para perfis assimétricos ou irregulares de penetração, como *finger shape* ou em forma de vale, como encontrado em [9]. Foi encontrada em uma referência, [43], a definição de diluição como o quociente do volume do metal de base fundido e o volume do metal de solda, po-

rém sem a descrição do método de medição. Adiante, no entanto, o mesmo artigo calcula a diluição pela profundidade de penetração, como em [37].

2.7. PTA-P Combinado – Arco não Transferido em Alta Corrente

Alguns autores citam o arco piloto apenas como o caminho pelo qual se forma uma conexão elétrica entre o eletrodo de tungstênio e a peça para o acendimento do arco principal [22, 23, 27]; outros, que ele se mantém aceso durante a soldagem, também com a finalidade de estabilizar o arco principal [19, 22, 29], especialmente para correntes baixas ou médias [17]. [12] atribui ao arco piloto o efeito estabilizador do arco principal apenas para correntes abaixo de 20 A no último. Em [11], este efeito estabilizador, que confere também mais rigidez ao arco, é atribuído à alta condutividade térmica do arco piloto. Uma faixa de 40 A a 50 A é recomendada em [16], para que se garanta eficácia e segurança no acendimento do arco piloto, que permanece aceso apenas para estabilização do arco principal, sendo que energia aportada ao substrato, influenciando a diluição, provém do arco principal [11]. Diaz [9] se baseou em outros trabalhos e adotou uma corrente de arco piloto de 14 A, que não danifica o ânodo (bico constritor) e é suficiente para abertura do arco principal (na verdade, houve dificuldade na abertura do arco principal quando se adicionou o gás de arraste). Este fato será descrito a seguir, no item 2.11. Para outros projetos de tocha, nos quais a refrigeração do bico constritor é mais eficiente, o valor pode ser maior, como será visto no capítulo de Resultados.

Na realidade, o fato é que se têm disponíveis, no PTA-P, duas fontes de energia. De acordo com as propriedades dos outros componentes do sistema, ambas podem ser manipuladas na busca de melhores resultados na solda. Isto é citado como uma das vantagens do PTA-P em [18] e outros trabalhos. [25] também expõe essa característica e introduz um conceito de proporção entre a energia do arco piloto e a do arco principal, em relação à energia total. Ao aumentar-se a proporção do arco principal, se obtém maior fusão do metal de base e vice-versa, ao aumentar a proporção do arco piloto, se obtém menor fusão do metal de base. Assim, sugere-se que, para deposição de ligas metálicas em pó de alto ponto de fusão sobre substrato de baixo ponto de fusão, a energia

seja fornecida principalmente pelo arco piloto. Um exemplo seria o revestimento de ferro fundido cinzento com ligas de níquel.

[86] descreve a variante do processo PTA-P denominada “PTA-P Combinado” (kombiniertes Plasma-Pulver-Auftragschweissen) como um desenvolvimento dos processos PTA-P e Aspersão Térmica, unidos. Neste trabalho, o arco piloto (arco não transferido) também é citado, para PTA-P normal, como estabilizador do arco principal em baixa correntes, de até cerca de 50 A. Já o processo combinado utiliza ambos os arcos para controlar diferenciadamente o aporte de calor ao pó e à peça. Adicionalmente à função de acender e estabilizar o arco principal, o arco piloto assume a tarefa de fundir totalmente o material de aporte em pó, enquanto o arco principal tem sua corrente reduzida, fundindo apenas superficialmente a base. As vantagens atribuídas a esta variante são: baixa penetração e diluição; melhores características mecânicas do revestimento; pequena ZAC.

Um aparato calorimétrico, também capaz de quantificar a constrição (com unidade em cm^{-2}) do plasma, foi construído para medição dos aportes térmicos de ambos [86]. Com o aumento da corrente do arco não transferido (piloto), se observou aumento da constrição e do aporte térmico entregue à peça, para uma regulagem constante da corrente do arco principal. Os comportamentos da constrição e do aporte térmico à peça, relativamente à corrente do arco piloto podem ser observados na Figura 2.42.

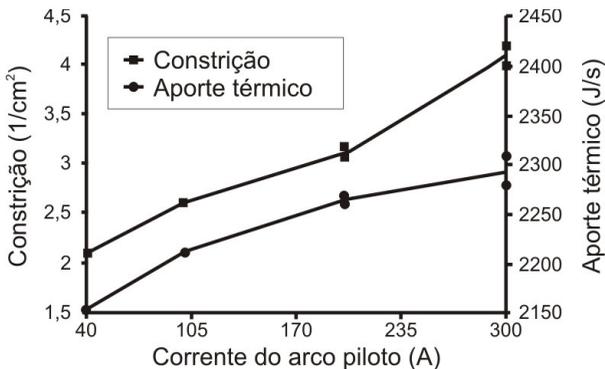


Figura 2.42. Constrição e aporte térmico à peça dos arcos principal e piloto (corrente do arco principal = 120 A, $V_{\text{gpl}} = 3,9$ l/min, diâmetro do orifício constritor = 4,0 mm) [86]

Segundo o mesmo trabalho, tanto o aumento da vazão de gás de plasma, assim como a redução do diâmetro do bico constritor resultam em aumento da constrição. A estabilidade do arco piloto em correntes baixas também melhorou com menores diâmetros do bico constritor. Um arco mais concentrado resulta em indesejável maior penetração (conclusão que concorda com [10, 37], comentados no item 2.11). Portanto, a redução do gás de plasma poderia compensar o efeito de colimação e conseqüente aumento da penetração, até o limite em que se perde a estabilidade do processo.

A eficiência do processo, calculada por:

$$\eta_p = P_w/P_{el} \quad (\text{eq 2.2}) [86]$$

(onde P_w é a potência total, dos dois arcos, aportada à peça e P_{el} a potência elétrica total fornecida a ambos os arcos) se manteve numa faixa de 0,32 a 0,48 (pouco abaixo da citada na Tabela 2.2 para PTA-P) para uma corrente do arco principal de 116 A e do arco piloto de 40 A a 250 A respectivamente, e diâmetro de constrição de 2,5 mm. Foram implementadas modificações (não detalhadas) na tocha tradicional para se alcançar esta faixa de valores (tocha com injeção interna). (Estes ensaios foram realizados, aparentemente, sem adição de pó.)

Foi considerada primordial a medição do calor aportado ao pó metálico pela tocha PTA-P quando a finalidade é entender as possibilidades de controle da distribuição de calor na solda. Nesta tentativa, foi construído um calorímetro especial, a partir de cujas medições são calculadas a entalpia e a temperatura média das partículas (faixa granulométrica 100 μm até 160 μm) aquecidas no arco de solda. O aumento da entalpia e temperatura média das partículas de material de adição advindos do aumento da corrente do arco piloto pode ser vistos no gráfico da Figura 2.43.

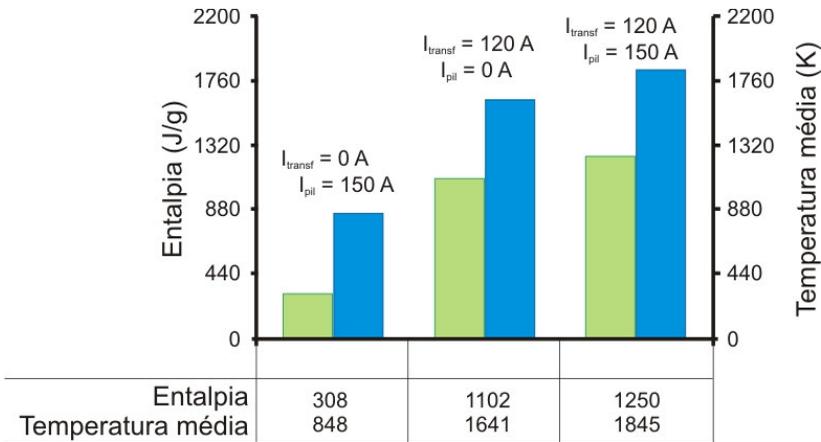


Figura 2.43. Comparação diferencial de entalpia e temperatura média das partículas da liga metálica em pó injetadas no arco de soldagem com os processos PTA-P e PTA-P Combinado [86]

A versão apresentada em [16] para o processo que tem o arco piloto como agente ativo foi denominado PTA com Arco Semi-Transferido (PSTA – Plasma Semi Transferred Arc). Basicamente, o princípio também consiste em aumentar o aporte de calor ao pó via aumento de corrente do arco piloto e redução do calor à peça e da diluição via redução da corrente do arco principal. O autor apresenta a Figura 2.44, na qual se tem a temperatura T_a , a que a partícula chega à poça de fusão. A partícula deve, então, retirar calor da poça de fusão para chegar à sua temperatura de fusão, T_b , gerando o ΔT_2 ($\Delta T_2 = T_b - T_a$). Quanto maior a T_a , menor será o ΔT_2 , ou seja, menor a quantidade de calor necessária fornecida pela poça para fusão da partícula, o que significa menor volume de banho fundido necessário e menor diluição. De fato, o princípio vai ao encontro dos fatos abordados no item 2.5, no que diz respeito ao estado semi-fundido do pó ao chegar à poça e ao fornecimento de calor da poça à partícula. Pode-se concluir que se deve buscar um ponto de balanceamento, no qual o aumento do pré-aquecimento do pó via aumento da energia do arco piloto permita reduzir a energia do arco principal para a mesma quantidade de pó fundindo na poça.

O arco piloto no equipamento utilizado em [16] tem capacidade de 150 A para o arco piloto. Uma faixa de 100 A - 110 A, no entanto, já foi suficiente para levar o pó a um estado semi-fundido desejado, mas o autor não apresenta as condições do ensaio.

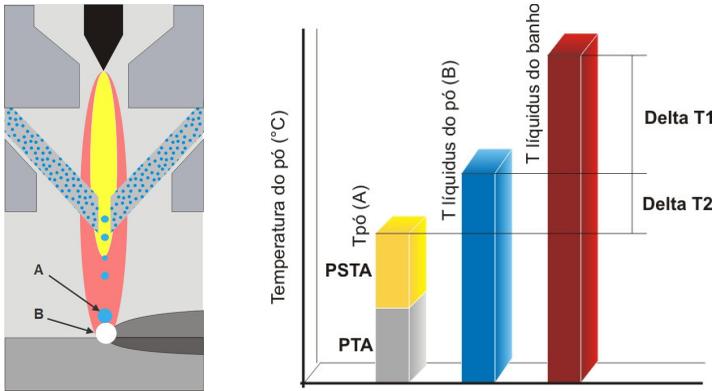


Figura 2.44. Evolução da temperatura do grão da liga metálica adicionada com utilização da técnica PSTA [16]

Alguns autores estudaram mais a fundo o comportamento do arco piloto. Este conhecimento pode ajudar a compreender melhor fenômenos que surgirem quando da investigação do parâmetro corrente do arco piloto no âmbito do presente trabalho e, desta forma, fomentar direcionamentos adequados do desenvolvimento da tecnologia. [12] mostra a Figura 2.45, na qual se expõe o comportamento dinâmico do arco piloto.

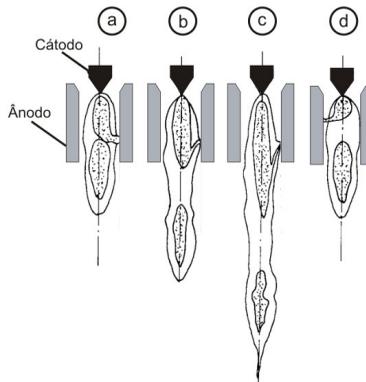


Figura 2.45. Dinâmica do arco piloto (crescimento, descolamento e reignição) [12]

Pulsos de alta frequência e alta tensão, fornecidos por uma fonte (chamada ignitor de alta frequência) entre o eletrodo (cátodo) e o bico constritor (ânodo) vencem o dielétrico e abrem o arco piloto. O gás de plasma arrasta o plasma ora formado para fora do bico, sendo que a raiz do arco permanece na superfície do ânodo (no interior do orifício constritor), formando a coluna de conexão ânodo / plasma, como se vê na figura. O fluxo de gás de plasma causa um contínuo alongamento da coluna de conexão, pois o ponto anódico se mantém fixo. A tensão, proporcional ao comprimento do arco (e dependente da corrente, diâmetro do orifício constritor, composição do gás de plasma e sua vazão), aumenta correspondentemente até o ponto em que a coluna se extingue. Imediatamente, outro arco se forma no ponto de menor distância radial entre a superfície externa do plasma e a superfície interna do ânodo. Portanto, a tensão varia numa frequência entre poucos kHz (Ar puro como gás de plasma) até 20 kHz (quando gases biatômicos estão presentes) [12]. O artigo cita que esta frequência interfere na erosão do ânodo e, portanto, na vida útil do bico.

Em [16] é sugerida uma hipótese similar: o arco se ignita entre o ponto sobre a superfície interna do bico constritor mais próximo (menor tensão requerida) da ponta do eletrodo e a ponta do eletrodo, chamado arco curto. O fluxo de gás de plasma empurra o arco, forçando-o a tomar uma forma de U, pois o ponto anódico permanece fixo. O comprimento total do arco cresce continuamente, pois o jato de gás de plasma continua empurrando a base do U para fora e adicionalmente há atuação da força resultante axial das forças eletromagnéticas, até que a tensão seja maior do que aquela necessária para que se ignite outro arco curto. Neste momento, se ignita este novo arco e o ciclo recomeça. Monitoramento por filmagem em alta velocidade revelou uma frequência de 15 kHz para este ciclo, que depende das condições de operação.

Em relação à influência do diâmetro do bico constritor, é reportado em [16] que sua redução implica em aumento da velocidade do gás de plasma, aumento da tensão, da temperatura e do grau de ionização do plasma.

2.8. Variantes do PTA-P

O processo PTA-P como outros processos de soldagem a arco, pode ser modificado em certo grau que caracterize uma variante, com

diferenças substanciais nos resultados ou na construção física do sistema. Assim, em [18] são citadas as variações:

- DCSP (Direct Current Straight Polarity - Corrente Contínua Polaridade Direta) - normalmente utilizada sobre aço, com o eletrodo permanentemente negativo e a peça permanentemente positiva.
- DCRP (Direct Current Reverse Polarity - Corrente Contínua Polaridade Reversa) - utilizada para soldagem de alumínio, com eletrodo permanentemente positivo e peça permanentemente negativa. Devido à excessiva sollicitação térmica sobre o eletrodo, é necessária tocha especial, descrita em [87].
- VPPA (Variable Polarity Plasma Arc - Arco Plasma com Polaridade Variável) - também para soldagem de alumínio, essa variante é um compromisso entre a limpeza catódica proporcionada pela polaridade reversa e a menor carga térmica sobre o eletrodo na direta.
- DCCP (Direct Current Combined Polarity - Corrente Contínua com Polaridade Combinada) - também para soldagem de alumínio, onde tanto o eletrodo, como a peça, são polarizados negativamente, e o bico constritor se torna o ânodo também para o arco principal. Deste modo é aproveitada a refrigeração mais eficiente do bico e se evita sobreaquecimento do eletrodo.

Já em relação às faixas de taxa de deposição, o mesmo trabalho e outros citam o Micro PTA (MPTA – 0,1 kg/h a 0,5 kg/h) o PTA (até 5,0 kg/h) e o High power PTA (HPTA – mais de 20 kg/h). Os limites colocados em [19] são: até 1 kg/h para MPTA (1 A a 50 A de corrente do arco principal), até 7 kg/h para PTA (50 A a 300 A de corrente do arco principal) e acima disso, normalmente até 15 kg/h, para o HPTA (300 A a 500 A de corrente do arco principal). Aplicações em pás de turbinas de vapor para o MPTA e em rolos de laminação para HPTA aparecem em [10]. O MPTA é citado como minimizador de retrabalhos, por permitir acabamentos de alta qualidade [23]. O uso de HPTA na fabricação de revestimentos de aços duplex foi analisado em [43], tendo resultado em diluição abaixo de 10% e, com isso, melhor resistência à corrosão do que revestimentos a Arco Submerso e Eletro-escória. Neste trabalho, uma taxa de deposição de 12 kg/h, que já considerou como HPTA, obteve os melhores resultados, sendo que 15 kg/h forneceram em cordões irregulares e oxidados em sua superfície.

Outra variante, chamada processo Duplo Pó (Zweipulverfahren) é aplicada em revestimentos duros e consiste na adição de dois pó diferentes, sendo que o pó que forma a matriz do revestimento é injetado no arco e o material duro, instável termicamente, é adicionado atrás do arco, diretamente na poça [23, 26]. Em [24] são apresentadas variações construtivas na tocha que permitem que material da matriz seja adicionado tanto em pó como em arame (como exemplo da Figura 2.19, item 2.4.1), diretamente no arco. O pó em liga de alta dureza é aplicado à poça de fusão fora do arco. Explica-se que o material duro não deve ser injetado no arco de modo a não permanecer muito tempo sujeito a calor excessivo, que causaria mudanças de fase ou difusão de C, prejudiciais às propriedades do revestimento.

Em [14] menciona-se a possibilidade de utilização de dois ADPs, com a finalidade de se alimentar duas diferentes ligas ao arco concomitantemente, por diferentes canais, evitando assim problemas de segregação no caso de pós com diferentes densidades. Esta aplicação demandaria calibração independente de cada ADP, para que se possam controlar as proporções das ligas alimentadas. Imagina-se, com um sistema similar também a possibilidade de se intercambiar o pó sendo alimentado. Schreiber [65], também utilizou dois ADPs, alimentando separadamente os orifícios injetores inferiores e superiores, com a finalidade de homogeneizar a aplicação na posição vertical.

2.8.1. Processo Híbrido Laser/PTA-P

Dentro de uma tendência de evolução mundial no campo da soldagem (em relação a processos e também metalurgia), processos híbridos vêm sendo investigados por alguns grupos de pesquisa. A denominação híbrida descreve a utilização de dois processos de soldagem, os quais atuam sobre a mesma poça de fusão [67, 88], sendo que a finalidade não é simplesmente somar características e sim, gerar novas vantagens a partir desta sinergia [89]. Os processos co-utilizados podem ser da mesma natureza quanto à fonte calorífica, por exemplo, o processo Plasma/MIG, ou de naturezas diferentes, como o Laser-MIG ou o Laser-PTA-P.

No caso da sinergia entre o Laser e um processo de soldagem a arco, as vantagens básicas buscadas são aumento da velocidade, proporcionado pelo primeiro, e robustez do processo, assegurada pelo segundo. Processos a Laser possuem alta concentração de energia, em um ponto focal de reduzidas dimensões. Desta maneira, bom controle de posicionamento da fonte calorífica, grande penetração e velocidade de proces-

samento, assim como baixo aporte térmico, com baixo volume fundido, são possibilitados. Todavia, devido a estas mesmas características, o processo exige um ótimo alinhamento e tem pouca tolerância a *gaps* entre as peças a serem unidas, demandando meticulosa preparação da junta e sistemas de posicionamento rígidos e repetitivos.

A introdução de um processo a arco com adição de material reduz os requisitos geométricos da junta a ser soldada, eliminando os altos custos de preparação [67] (Laser permite apenas baixas quantidades de material de adição [89]). Na soldagem híbrida Laser-PTA-P de união de aços inoxidáveis austeníticos, houve redução das trincas a quente [67] e trincas de liquação [88].

A vantagem do Laser-PTA-P sobre o Laser-MIG reside no fato de que no primeiro a energia do arco e o aporte de material são controlados independentemente, permitindo alto grau de controlabilidade da poça de fusão [67, 88]. Esta vantagem é colocada em [89] como fator predominante na escolha por esse processo. Inclusive o PTA-P oferece a possibilidade de se atuar também ativamente com o arco piloto, como explicado anteriormente. A alimentação em forma de pó também propicia benefícios quanto à estabilidade da poça em relação ao arame [67, 89], fornecendo maior controlabilidade em soldas fora da posição plana [88]. No Laser-PTA-P o material é alimentado à poça em forma de partículas muito finas que não perturbam geometricamente a poça líquida. Já as gotas provenientes da ponta do arame, no caso do Laser-MIG, são significativamente maiores e causam severa agitação na poça, podendo desestabilizar e fechar o eventual *keyhole* formado, exigindo maior acuidade no posicionamento entre as fontes caloríficas e reduzindo a robustez do processo [67, 89]. Constatou-se também uma vantagem metalúrgica quando da solda de aços inoxidáveis auteníticos: o Laser-PTA-P permite que o material de adição chegue até o fundo da raiz, melhorando a formação da liga e reduzindo a suscetibilidade a trincas a quente inerente a estes aços, em altas taxas de resfriamento [89]. Além disso, a solda é mais estreita e a ocorrência de respingos grosseiros e poros, que podem aparecer do processo MIG, podem ser mais facilmente anulados com o PTA-P [89]. Estudos desenvolvidos em [88] e [89] mostraram a factibilidade de soldas também nas posições vertical ascendente e descendente, além da plana.

Devido a estas vantagens, o maior potencial de benefícios recai sobre aplicações em chapas grossas, encontradas na fabricação de dutos (costura e união de topo), construção naval, construção offshore [89] e indústria de transportes [67]. A indústria naval já vem aplicando o Laser-MIG [89]. Em [67] também são relatadas investigações da soldagem

de alumínio com o Laser-PTA-P, mantendo a polaridade direta. A camada de óxidos foi removida pelo laser correndo à frente.

Na literatura especializada, se encontram exemplos da configuração física do processo híbrido PTA-P-Laser. De acordo com a disposição dos componentes, naturalmente, surgem novos parâmetros que não existiam para quaisquer dos processos isoladamente. A Figura 2.46 mostra um design de cabeçote Laser-PTA-P [89].

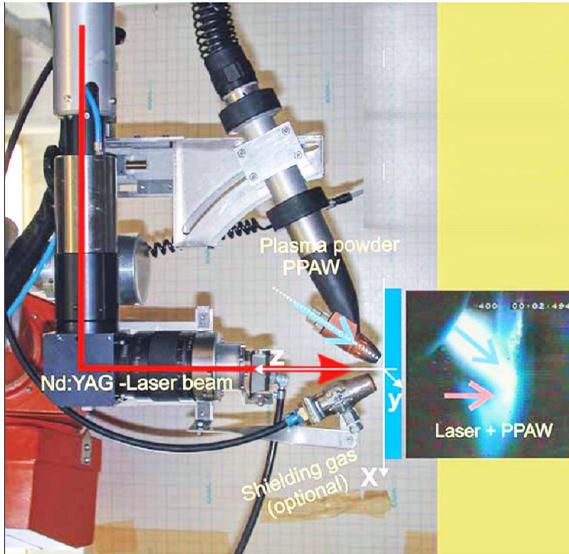


Figura 2.46. Cabeçote híbrido Laser-PTA-P [89]

A Tabela 2.8 exhibe exemplos parâmetros de soldagem utilizados no processo híbrido Laser-PTA-P.

Tabela 2.8. Exemplos de parâmetros do processo híbrido Laser-PTA-P (em [20] se investigou soldagem de revestimento e nos outros exemplos, soldagem de união)

Parâmetro	Regulagem	Observações
Tipo de laser	Nd:YAG [20]	2 kW
	Nd:YAG [67]	4,4 kW
Distância focal do Laser	20,0 mm [67]	
Potência do Laser	1,8 kW [20]	
	4,0 kW [89]	Espessura da chapa de aço inoxidável: 4,0 mm
	4,3 kW [67]	Espessura da chapa de aço inoxidável: 8,0 mm
Beam parameter product	23,4 mm x mrad [67]	Quanto menor, melhor
Velocidade de soldagem	60 cm/min [20]	
	3 m/min [67]	Espessura de chapa: 3,0 mm
	2 m/min [89]	
Corrente de soldagem	50 A [20]	
	160 A [67]	
Vazão de gás de plasma	1 l/min [67]	
	2 l/min [20]	
Vazão de gás de proteção	5 l/min [67]	
	10 l/min [20]	
Comprimento de onda	40 μ m a 100 μ m [89]	Espessura de chapa: 4,0 mm
Vazão de pó	26 g/min [89]	
	1,6 kg/h (aprox. 26,7 g/min) [20]	Dobro do Laser puro
	22 g/min [67]	

Os exemplos anteriores abordam a soldagem de união. Em [20], Dolles investigou o processo híbrido Laser-PTA-P para soldas de revestimento utilizando uma liga de Ni como metal de adição em pó sobre aço S235J. A aplicação do processo Laser puro (Laser *cladding*) traz

benefícios como camadas densas, homogêneas, baixo aporte térmico e baixa diluição. A utilização de baixa vazão de gás de proteção (3,0 l/min a 4,0 l/min) e aquecimento por absorção do feixe somente na superfície da peça garante ao Laser uma baixa dinâmica na poça, com um cordão mais liso e uniforme. No entanto, o alto custo do equipamento e baixa eficiência foram considerados desvantagens a serem sobrepujadas. Assim como os autores anteriores, Dolles também afirma que sinergia entre ambos os processos traz maior capacidade de deposição, em kg/h, com a mesma, ou melhor, qualidade que o laser puro, colocando esse aumento de eficiência e conseqüente redução de custos como seu objetivo geral. De fato, seus resultados mostraram a possibilidade de se dobrar a taxa de fusão de pó, o que é vislumbrado como um atrativo industrial de forte apelo.

Como exemplo do potencial de melhoria, a Figura 2.47 mostra uma comparação entre os processos de soldagem MIG, Laser e híbrido com os dois.

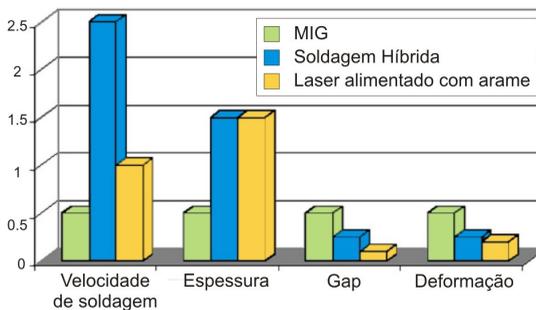


Figura 2.47. Comparação entre processos de soldagem [20]

Diferentemente da configuração utilizada para solda de união no exemplo anterior, em [20] tanto a tocha como o cabeçote laser foram posicionados inclinados em relação à peça, como mostra a Figura 2.48, com o PTA-P puxando e o laser desfocado e empurrando. Nota-se que há adição dos parâmetros geométricos a serem verificados na pesquisa, como em [67] e [89].

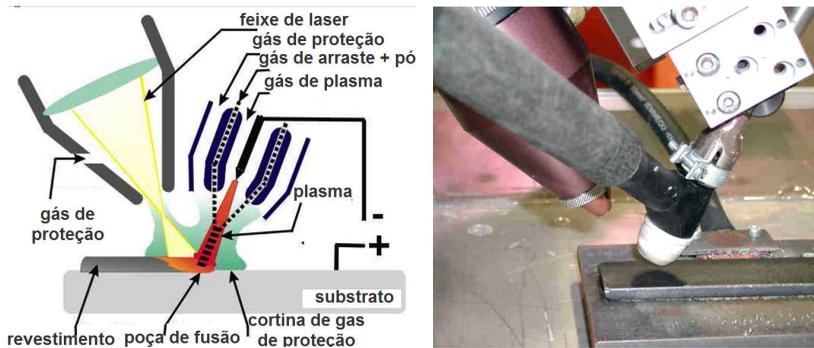


Figura 2.48. Posicionamento do plasma e do feixe laser [20]

Como vantagens sinérgicas, se enumeram:

- Aumento do coeficiente de absorção do feixe de laser, pelo pré-aquecimento do metal de base e pó executado pelo PTA-P;
- Menor potência requerida;
- Absorção pelo plasma do feixe refletido, aumentando sua temperatura.

Há também o fato de que a potência aportada ao processo pelo Laser não causa aquecimento por efeito Joule na peça, o que, junto à maior velocidade de soldagem, ajuda a reduzir a zona termicamente afetada. Ainda, Dolles menciona que o laser auxilia na abertura do arco, pelo aquecimento do gás de plasma. Pode-se remeter a essa propriedade do processo híbrido para investigações da soldagem de alumínio em CA, facilitando as sucessivas reaberturas de arco.

2.9. PTA-P Pulsado

A utilização de corrente pulsada tem trazido benefícios em processos de soldagem a arco. Em se tratando de um processo a eletrodo permanente (PTA-P), não entrará nessa análise a pulsação em alta frequência para destacamento de gota do processo MIG/MAG. No entanto, mesmo para este processo, a Pulsação Térmica em baixa frequência, sobreposta à pulsação para destacamento de gota, permitiu melhoramentos na robustez do procedimento e controlabilidade da poça metálica para aplicações, por exemplo, na posição sobrecabeça [90]. Já no pro-

cesso TIG, além de controlabilidade da poça e da facilitação da adição manual de material em baixas frequências, é possível se obter constrição do arco com altas frequências (aprox. 5 kHz) [91].

Quanto ao PTA-P, o uso de corrente pulsada já propiciou soldas fora de posição e manipulação da seção transversal, penetração e forma do cordão, segundo [25], porém maiores detalhes de parâmetros ou aplicação não são fornecidos. De acordo com [46], a técnica traz vantagens tanto do ponto de vista metalúrgico como de processo e a maior delas (ou a origem dos benefícios) são os pulsos de alta corrente sem alteração no aporte térmico médio ao substrato. O autor do presente trabalho ressalva que o aporte térmico deve ser medido de maneira direta, por exemplo, por intermédio de calorímetros, pois há diferenças entre a eficiência térmica nos procedimentos e processos de soldagem que não podem ser desprezadas.

Nas condições utilizadas nos testes de [46] (correntes de pulso: 170 A e 220 A, tempo de pulso: 5 ms, corrente de base: 75 A, tempo de base: 8 ms), corrente pulsada sobre aço carbono causou mordeduras, fato que excluiu os corpos de prova correspondentes das análises posteriores. Neste trabalho se faz comparação de diluição entre soldas com corrente pulsada e corrente constante. Todavia, o parâmetro de comparação estipulado na metodologia foi manter para a corrente constante o mesmo valor da corrente de pulso do modo pulsado. É natural, então, que o modo constante resulte em maior diluição que o modo pulsado, quando os outros parâmetros foram mantidos similares, pois são energias substancialmente diferentes. Uma metodologia mais adequada seria manter similares a corrente média do modo pulsado e a corrente do modo constante e verificar, então, de fato a influência da pulsação. A potência média (monitorada adequadamente e calculada com valores instantâneos de corrente e tensão [92]) poderia, da mesma forma, consistir no parâmetro fixo de comparação.

Nas amostras exibidas em [46], se vê maior refinamento (maior taxa de nucleação) da microestrutura daquelas que foram soldadas no modo pulsado, para dois níveis de corrente, de acordo com a condição exposta acima. É afirmado que o aumento da taxa de nucleação no caso do PTA-P não pode ser atribuído à quebra dos braços de dendritas ocasionada pela agitação da poça metálica encontrada no modo pulsado, pois, comparados com o tamanho das partículas de pó, eles são muito finos para sobreviver na poça de fusão e, assim, refundiriam.

O maior refinamento do PTA-P (também verificado por [9]), em relação ao PTA-A é consequência de maior taxa de nucleação advinda de aglomerações de partículas de pó (menores que gotas transferidas do

aramé, como citado em [47]) agindo como núcleos. Teoria semelhante foi descrita por Pavlenko [35] já citada neste texto.

Seguindo a mesma linha, maior refinamento microestrutural no PTA-P pulsado em relação ao modo constante pode ser atribuído à formação de ainda menores aglomerações de partículas de pó que funcionam como núcleos, devido ação da pulsação de corrente. O maior super-resfriamento da poça observado em soldagem pulsada permite que menores núcleos “sobrevivam” no banho líquido [46]. O trabalho mostrou também que estruturas mais refinadas foram observadas sobre depósitos em substrato de aço carbono do que em depósitos em aço inoxidável, o que se deve à maior condutividade térmica do primeiro, e conseqüente maior taxa de resfriamento. Ressalva-se que esta verificação foi efetuada sobre as soldas em corrente constante, pois as soldas em corrente pulsada sobre aço carbono foram dispensadas, como já citado.

Díaz [9], por sua vez, atribuiu o refinamento da microestrutura à quebra de dendritas resultante da agitação da poça obtida no modo pulsado. Ele também averiguou, dentro das condições de sua pesquisa, que uma freqüência de 2,5 Hz e bico constritor com injeção de pó externa a 60° (Díaz mediu este ângulo entre a face do bico constritor e o eixo do canal injetor) obteve a menor diluição, como se vê na Figura 2.49. Não foi feita, entretanto, nenhuma hipótese para causa desse resultado.

No mesmo trabalho foi colocada a limitação do PTA-P quanto à impossibilidade de pulsação da alimentação de material, em conjunto com a pulsação de corrente. Não obstante, uma das inovações propostas no presente trabalho é o projeto e construção de um sistema para pulsação do pó.

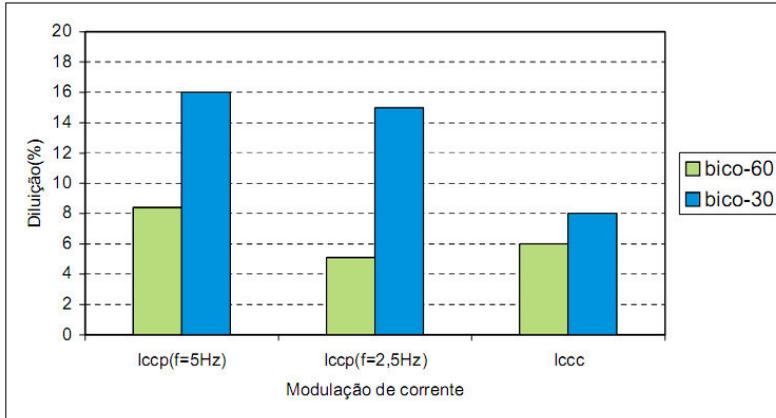


Figura 2.49. Diluição em função da modulação de corrente e ângulo de injeção de pó do bico constritor (corrente média: 160 A, corrente de pulso: 200 A, corrente de base: 120 A, tempo de pulso igual ao tempo de base: 0,1 s para frequência de 5 Hz e 0,2 s para frequência de 2,5 Hz) (Díaz [9] mediu o ângulo de injeção entre a face do bico constritor e o eixo do canal injetor) [9]

[42] aborda o modo pulsado no PTA-P a partir do objetivo de obter menor distorção da peça, consequência do menor aporte de calor, e, conseqüentemente, redução de custos de retrabalho. A fase de pulso permite bom controle da poça metálica, enquanto a fase de base propicia melhores condições térmicas (em termos de menor calor entregue à peça durante a solda). É recomendada por Matthes [42] a introdução das relações

$$HI = (I_G / I_p) \times 100 \text{ (em \%)} \quad (\text{eq. 2.3})$$

e

$$V = (t_p / T) \times 100 \text{ (em \%)} \quad (\text{eq. 2.4}),$$

onde HI é a relação de correntes (I_G é a corrente de base, I_p é a corrente de pulso) e V é o fator de ciclo de pulso (t_p é o tempo de pulso, T ($T = t_p + t_b$) é o período, e t_b é o tempo de base), para reduzir o número de parâmetros dos cálculos. Para o cálculo do aporte térmico são utilizados os valores médios de corrente e tensão médios, os quais são multiplica-

dos ($U_m \times I_m = P_m$, potência média) e divididos pela velocidade de soldagem (método tradicional). Todavia, em [92], foi mostrado que o cálculo correto de potência média se dá por:

$$P_m = \sum I_i \times U_i / i \quad (\text{eq. 2.5}).$$

Para determinação de parâmetros de onda otimizados foram utilizadas como critérios a geometria do cordão (altura e largura), diluição, dureza e distorção da peça [42]. O autor não relatou os efeitos da pulsação de corrente sobre cada um destes critérios. Foi reportado que aumento da corrente de pulso resultou em aumento da corrente média e, então aumento da diluição e distorção, mas a altura do cordão permaneceu constante. Já o aumento da corrente de base causou aumento na penetração, menor altura do cordão e, de maneira acentuada, maior largura. Aqui, as diferentes potências médias P_m e o aportes térmicos à peça certamente foram determinantes para os resultados, assim como possíveis variações na taxa de deposição, porém isso não é comentado pelo autor. Parte-se, no artigo, para análise de alterações no HI (relação entre correntes). Um aumento de HI resultou em maior diluição e maior deformação, quando se aumentou a corrente de base. A influência da corrente de pulso na análise pela HI foi maior que a de base para a deformação das peças. Além disso, uma pulsação forte (baixa HI) resulta em menor aporte térmico à peça que pulsação fraca (alta HI). Apesar de o autor não explicitar esse fato, acredita-se que foi mantida como parâmetro fixo a corrente média, e se alteraram os tempos, juntamente com as correntes de pulso e base, na análise da influência de HI (nesta etapa, a dinâmica da fonte deve ser considerada e analisada, pois para grandes alterações de corrente em pequenos tempos, há a possibilidade de não alcance da corrente regulada; o autor considerou este fator para definição dos limites da experiência). Um aumento no tempo de pulso resultou em aumento na corrente média e no aporte térmico; a largura do cordão e a diluição aumentaram, para uma altura constante. Comportamento diferente é observado com aumento do tempo de base e redução da corrente média, ou seja, a altura do cordão aumenta com largura decrescente, sendo que a penetração permanece aproximadamente constante. O tempo de base determina, segundo [42], a intensidade da solidificação, de modo a evitar superaquecimento na fase de pulso seguinte. Com seu aumento, a diluição e a distorção caíram e a dureza aumentou. Recomenda-se atentar, no entanto, para que os tempos sejam definidos de modo a evitar descontinuidades na fusão. Se V é aumentado, maior aporte térmico e maior deformação o acompanham.

Outro benefício que pode surgir da aplicação de corrente pulsada é a redução da segregação de partículas duras como TiC e WC, pelo estímulo dinâmico imposto à poça de fusão.

2.10. Soldagem PTA-P em posições forçadas (fora da plana)

Aplicações e procedimentos relativos à soldagem PTA-P fora da posição plana são raramente mencionados na literatura. Como visto anteriormente, grande parte das aplicações atuais se destinam a peças que podem ser desmontadas e posicionadas para o revestimento, ou são revestidas anteriormente a seu comissionamento.

Segundo [25], o modo pulsado possibilita soldas em posições forçadas. Maiores detalhes, no entanto, não são fornecidos.

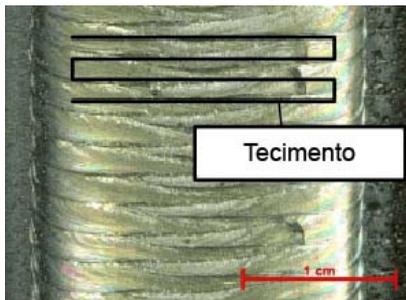
Schreiber [93] apresenta desenvolvimentos em soldagem PTA-P para soldagem na posição vertical e chega a um procedimento na posição vertical descendente, com tecimento, especificamente para peças da indústria mineradora. Uma premissa é que o aporte térmico por comprimento de solda deve ser menor que na posição plana, a fim de que se evite o escorrimento da poça.

Em outra obra [65], o mesmo autor apresenta um modelo de bico constritor cujo projeto construtivo visa evitar desbalanceamento de injeção de pós através dos orifícios superiores e inferiores quando de soldagem na posição vertical. Sendo assim, se utilizam dois alimentadores de pó independentes, para cada um dos dois conjuntos de três orifícios injetores (Figura 2.50). Além da taxa de alimentação, esta configuração permite a adição de dois materiais diferentes para cada conjunto de orifícios, como também sugerido em [14].

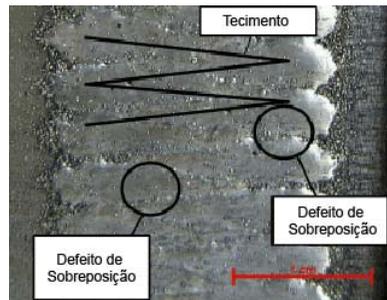


Figura 2.50. Bico constritor modificado, que permite regulagem independente de alimentação de material em pó para os orifícios injetores [65]

No mesmo trabalho, Schreiber relata um procedimento na vertical ascendente (banho sustentado pelo material já depositado abaixo) e com tecimento retangular (mantendo sempre as mesmas características de sobreposição nos filetes subseqüentes, evitando defeitos de sobreposição), como mostra a Figura 2.51.



Tecimento retangular



Tecimento triangular

Figura 2.51. Soldas realizadas na posição vertical [65]

Diaz [9] realizou testes em soldagem horizontal e sobrecabeça (a Figura 2.52 mostra suas montagens experimentais). Observou que a posição de soldagem não exerce influência sobre a microestrutura da solda, apesar de modificar a geometria e diluição dos depósitos. A principal alteração se nota na altura do cordão, como mostra a Figura 2.53.

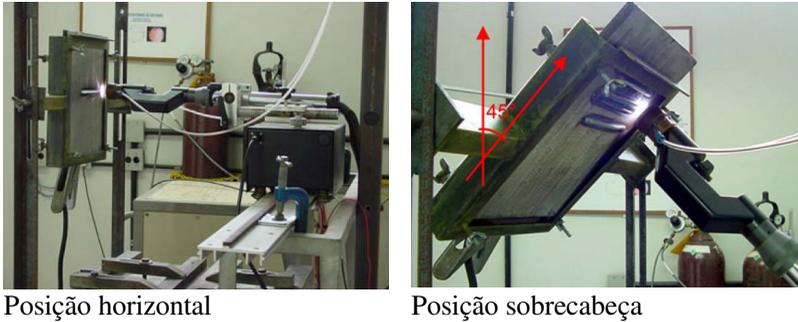


Figura 2.52. Montagens de bancada para ensaios de soldagem PTA-P em posições forçadas [9]

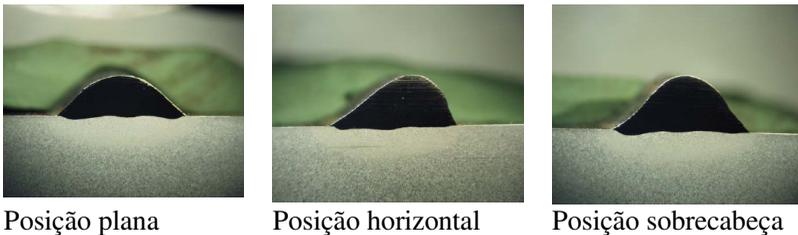


Figura 2.53. Seção transversal de cordões realizados em posições forçadas [9]

2.11. Parâmetros

Dentre os parâmetros hoje disponíveis do processo PTA-P, um mapeamento das influências de diversos deles, sob determinadas condições, foi realizado no LABSOLDA no contexto de [9]. Todos os parâmetros têm dada importância nos resultados. Todavia, alguns se mostram mais determinantes, com suas variações resultando em alterações mais intensas nas características da solda. Segundo [36], em geral os parâmetros que determinam a qualidade da solda são vazão mássica de pó, taxa de deposição, vazão dos gases do processo, corrente do arco principal e DBP. Como será visto, a lista se estende, principalmente quando se utilizam variações do processo, como corrente pulsada. O presente trabalho pretende inserir/investigar mais parâmetros no proces-

so, a fim de obter maior potencial de melhorias nos resultados de aplicações específicas.

2.11.1. Parâmetros elétricos

A potência do arco principal, e conseqüentemente, o calor aportado à peça, dependem fortemente da corrente do arco principal. Segundo [23], os defeitos de soldagem advêm essencialmente de irregularidades no calor aportado à peça e à poça fundida. O trabalho não cita como é calculado este aporte térmico, mas menciona que correntes muito baixas acarretam em falta de fusão nas laterais do cordão e, por outro lado, correntes altas causam excesso de diluição. Na Figura 2.54 é mostrada, a título de exemplo, uma relação entre aporte térmico à peça e corrente do arco principal, medido segundo metodologia calorimétrica de Marconi [16].

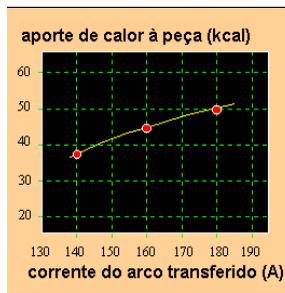


Figura 2.54. Aporte térmico à peça em função da corrente do arco principal [16]

O efeito nocivo de correntes demasiadamente altas citado em [37] é a maior suscetibilidade a trincas, o que pode ser resolvido por oscilação da tocha de soldagem. Em [10], o efeito nocivo seria a vaporização do pó e conseqüente redução do rendimento de deposição. Já em [25] o efeito da corrente do arco principal é analisado dentro de uma proporcionalidade com o arco piloto, de maneira que o incremento da proporção de energia do arco principal resulta em maior fusão do material de base. Ao contrário, maior proporção energética do arco piloto propicia menor taxa de fusão do material de base.

O valor ótimo de corrente, segundo [10], é o mínimo que resulta em máxima taxa de fusão de pó (e sua adequada deposição) para determinada taxa de alimentação. Quanto maior a corrente, maior a taxa de

fusão. Um valor menor seria insuficiente para fundir o pó ou a peça e, nesse caso, haveria falha na formação do cordão (falta de fusão). Estas premissas estão de acordo com aspectos expostos no item 2.5 e 2.7, quanto à transferência de calor da poça às partículas incidentes e manipulação do arco piloto, e com [51], quanto à formação de aglomerados de partículas não incorporadas à poça, devido a molhabilidade insuficiente (resultando em falha no cordão).

Em [10] é sugerida a Equação 2.6:

$$U = C_R + 0,33I \qquad \text{eq.(2.6) [10]}$$

para a determinação de uma relação entre tensão (U) e corrente (I), que resulta em depósitos com qualidade. C_R é uma constante para a qual o autor não fornece explicações.

De acordo com [47], valores de corrente do arco principal demasiadamente altas (cerca de 250 A) causam maior oxidação sobre o cordão, redução da dureza, devida à maior diluição, e correntes demasiadamente baixas (cerca de 70 A) causam descontinuidades no cordão de solda (o autor não informa a vazão de pó constante utilizada, mas leva a crer que seria um valor adequado a 130 A, tomado como padrão). Este trabalho se relaciona com a teoria anteriormente exposta neste texto (item 2.9) e defendida em [46], quanto ao maior refino microestrutural obtido com material de adição em pó. Bond [47] faz referência à influência da intensidade de corrente (em modo constante) no tamanho dos agregados de pó que agem como nucleantes na solidificação. Porém, suas conclusões deixam margem a uma dúvida: relata-se que baixos níveis de corrente resultam em estrutura mais fina e maior dureza devida à menor diluição. Mas não se têm uma clareza quanto à sua conclusão em relação à origem da estrutura mais fina: aglomerados de partículas (nucleantes) de menores tamanhos ou diferença na solidificação proveniente de diferentes gradientes de temperatura, também citados no texto? Maiores níveis de corrente resultam em estrutura mais grosseira e menor dureza, a qual a autora atribui à maior diluição.

Marconi constatou maior intensidade de calor transferido ao bico constritor com aumento da corrente do arco principal [16]. Sua teoria: o campo magnético gerado pelo arco resulta num invólucro de gás frio que impede o contato entre o interior do bico constritor e a zona quente do arco. Assim, a transferência de calor por radiação nesta área é dominante em detrimento da convecção. Aumento da corrente resulta em aumento da temperatura do arco, da qual a intensidade de radiação é dependente em relação direta. A Figura 2.55 ilustra os resultados que

suportam essa idéia. O total do calor ao bico foi medido por calorimetria.

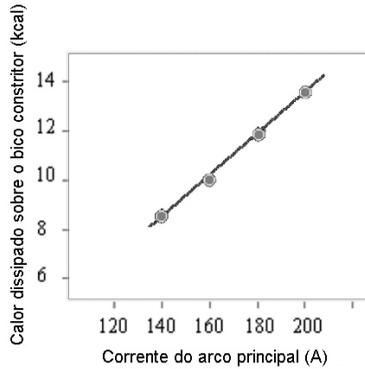


Figura 2.55. Calor dissipado sobre o bico constritor, em função da corrente do arco principal [16]

Som, em [40], também observou uma relação direta entre a energia transmitida ao bico constritor e a corrente do arco principal ao medir por calorimetria o calor transferido ao bico, mas atribuiu esse comportamento ao aumento do diâmetro do arco com o aumento da corrente do arco principal, resultando em mais área de contato entre o bico constritor e o arco. Ambos utilizaram tochas com injeção interna de pó. Som conclui, assim, menor eficiência térmica (relativa à peça) para maiores correntes do arco principal [40] (Figura 2.56).

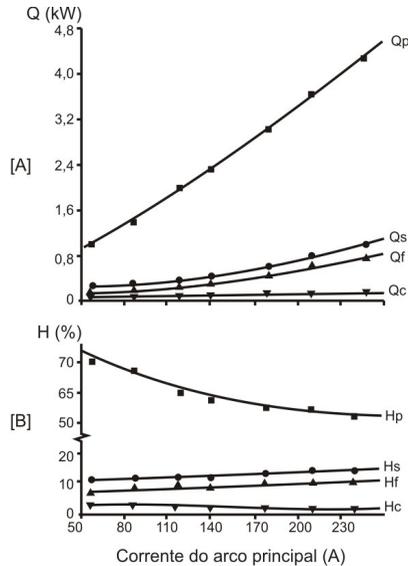


Figura 2.56. Influência da corrente principal sobre a potência transferida à peça (Q_p), ao bico constritor (Q_s), ao bocal focalizador (Q_f) e ao eletrodo de tungstênio (Q_c) e eficiência de aquecimento relativa de cada uma destas partes (H_p , H_s , H_f e H_c) [40]

A influência da corrente sobre o calor transferido ao pó (medida por calorímetro rotativo [16]) é modesta. Como esperado, há uma relação direta entre os parâmetros, mas o aumento da corrente resulta também em redução do tempo em que o pó fica no arco, recebendo calor deste [16]. Este efeito de compensação é mencionado também em [35]. Lembra-se que em [30] foi calculado um perfil radial em vale para a velocidade das partículas como na Figura 2.36, no qual se sugere que a velocidade do pó é menor para maiores correntes ao longo do eixo do arco, e para a periferia isso se inverte. Ou seja, a magnitude do efeito compensatório pode depender também do projeto da tocha, quanto ao tipo e ângulo de injeção de pó e granulometria e velocidade de injeção das partículas [35].

2.11.2. Vazões dos gases do processo

Em termos de gases, aumento de vazão de gás de plasma resulta em maior rigidez do arco, mas o excesso traz maior penetração acompanhada de prejuízo ao acabamento superficial, de acordo com [37], e maior velocidade do jato plasma e turbulência, causando menor eficiência do gás de proteção, irregularidade no transporte do pó, poros e inclusão de óxidos, segundo [10]. Como se vê, os dados colocados em [10] explicam parcialmente as conseqüências citadas em [37]. Com aumento da vazão de gás de plasma, Som [40] mediu maior calor transferido à peça (atribuído à maior concentração de energia, à redução de perdas no bico constritor e maior convecção no ânodo) e maior eficiência térmica. Obteve-se ao mesmo tempo maior diluição.

Por intermédio de modelamento e simulação via software de elementos finitos, foi avaliado o comportamento da pressão do arco sobre a poça metálica para diferentes vazões de gás de plasma [68], como mostrado na Figura 2.57.

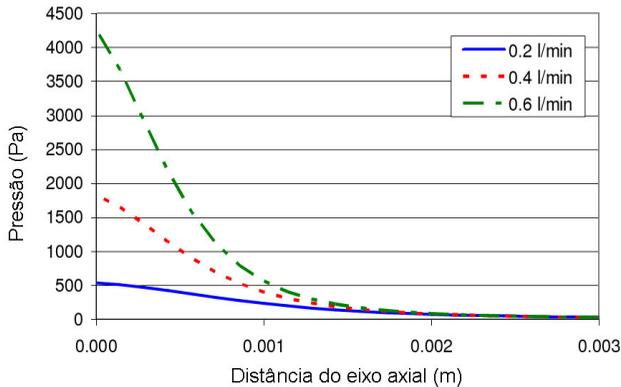


Figura 2.57. Relação entre a pressão sobre a poça e a vazão do gás de plasma em simulação por elementos finitos (Condições de simulação apresentadas: $I = 120$ A, $V_{gpl} = 0,3$ l/min, $V_{gprot} = 9,0$ l/min, $DBP = 10$ mm) [68]

Em [11], que aborda juntamente com o PTA-P também a soldagem keyhole, a densidade de potência é colocada como principalmente dependente da vazão de gás de plasma.

Segundo [16], em conseqüência da redução da vazão de gás de plasma se obtém aumento do calor transferido ao bico constritor (como

em [40]). Isto decorre do fato de que o invólucro de gás frio que isola a superfície do orifício constritor (como explicado anteriormente neste item) também se reduz juntamente com a velocidade do gás de plasma. Sem citar outras condições, o autor exemplifica uma redução de calor aportado ao bico constritor de 30 % com o aumento na vazão do gás de plasma de 1,5 l/min para 3,0 l/min. No mesmo trabalho se apresenta a Figura 2.58, que mostra um alongamento das isotermas com aumento da vazão do gás de plasma (medições por espectrofotometria).

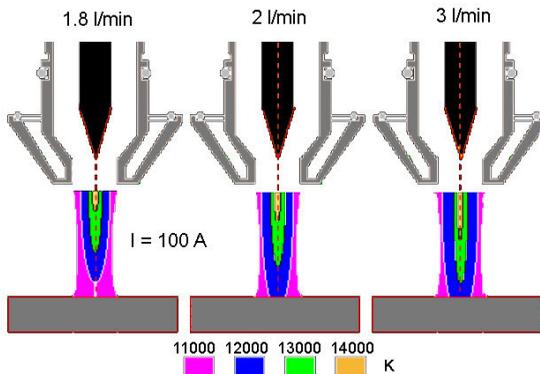


Figura 2.58. Distribuição radial da temperatura do arco, para diferentes vazões de gás de plasma [16]

Ao analisar o parâmetro vazão de gás de proteção, [37] afirma que um baixo valor causa oxidação extrema e a superfície da solda fica preta. Já quanto ao gás de arraste, se estiver sendo injetado com vazão excessiva, ocasiona turbulência no arco, sucção de ar atmosférico e porosidade. [10] sugere, por sua vez, que um valor acima do limite resulta no carreamento do pó além da coluna de plasma, causando desperdício. Isto pode também contribuir para formação de partículas aglomeradas aderidas ao lado do cordão para ângulo de injeção de 30°, reportadas em [9].

Para a configuração do equipamento utilizado em [9] uma vazão de gás de arraste de pó abaixo de 2,0 l/min causou falhas no transporte, pois há acúmulo de pó nas mangueiras que o conduzem do ADP até a tocha. Foi verificado também neste trabalho que a taxa de vazão de pó não se altera com variação da vazão de gás de arraste, fato esperado, já que a dosagem era feita pela rotação do ADP. Outra influência do gás de

arraste recai sobre a abertura do arco principal. Diaz [9] (que usou tocha com injeção externa de pó) verificou que o jato de gás de arraste atua como “isolante” entre o plasma do arco piloto e a peça. O problema foi solucionado pela implementação via software de um *delay* entre a abertura do arco principal e o início da alimentação de gás de arraste. A vazão de gás de arraste teve um efeito baixo (cerca de 1 V, para variação de 0 a 6 l/min) sobre a tensão do arco principal e apenas quando se aplicou injeção de pó a 60°. Som [40], utilizando um aparato calorimétrico e tocha com injeção interna de pó, verificou que o calor transportado à peça e a eficiência térmica do processo caíram com maior vazão de gás de arraste. Isso se deve ao fato de que esse fluxo de gás não tem efeito constritor do arco, apenas consome calor dele.

2.11.3. Alimentação de material

Relata-se, em [52], que um aumento na vazão de pó constringe e refrigera a coluna do arco, surgindo o *efeito pinch térmico* (não explicado detalhadamente no texto), resultando em penetração *finger shape* (e maior profundidade) devido à maior temperatura e velocidade do plasma, na soldagem de revestimento com carbonetos em pó (TiC, NbC, SiC) sobre liga de Al. Por outro lado, este mesmo efeito causa maior agitação da poça, expulsando gases e reduzindo porosidade.

Para corrente da ordem de 125 A (a 15 cm/min), em revestimento com Cu em pó sobre liga de Al e alimentação excessiva de material, a fusão do metal de base não é suficiente gera-se, então, espalhamento de partículas e/ou depósito de gotas esféricas de maior diâmetro que o pó original surge na superfície [36]. Como reportado em [52], em [36] também se observa maior penetração com o aumento da vazão de pó. Entretanto, neste último, o fenômeno é explicado pela crescente geração de calor advinda de reações de formação de compósitos. Ambos os trabalhos versaram primordialmente sobre questões metalúrgicas, sem muito detalhamento quanto ao processo. Sabe-se, no entanto, que em [52] foi utilizada polaridade direta e corrente contínua e, em [36], corrente alternada com razão entre os tempos de polaridade negativa e positiva de 75% / 25%. (Majores considerações sobre soldagem do alumínio, como p. ex., limpeza catódica, não são tecidas neste texto pelo fato de o material não fazer parte do escopo. Não se exclui, porém, esta investigação em outros trabalhos a ser realizados.)

No caso do aço se observa o efeito contrário: maior taxa de alimentação de pó ao arco resulta em menor diluição [9, 10, 61]. Possíveis explicações, já comentadas anteriormente neste texto, são fornecidas em

[27 e 39] (a poça tem um efeito isolante térmico entre o arco e o substrato, pois no PTA, o arco se concentra sobre a poça e não sobre o material sólido), e em [34] e [35] (maior quantidade de pó alimentado retira mais calor da poça ao se incorporar a ela). Em [11] é tomado outro ponto de vista sobre essa correlação: quanto maior a V_{mpo} , maior a diluição, pois maiores deposições significariam maior corrente do arco principal requerida.

Hallen obteve em suas investigações o gráfico da Figura 2.59, que inter-relaciona diluição e corrente do arco principal sob diferentes combinações de vazão mássica de pó e vazão do gás de plasma, com os outros parâmetros fixos [61]. Observa-se que tanto a vazão de pó, quanto a vazão de gás de plasma, exercem grande influência sobre a diluição. Esse gráfico concorda com representação semelhante em [16], onde adicionalmente se afirma que o aumento da vazão de pó torna a diluição menos sujeita a influência da corrente.

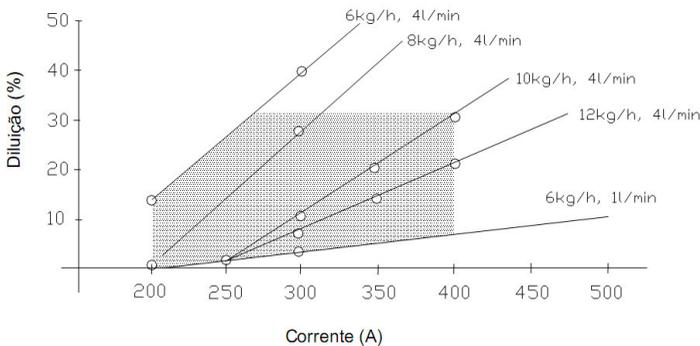


Figura 2.59. Diluição versus corrente do arco principal em diferentes vazões de pó e de gás de plasma [61]

2.11.4. Parâmetros geométricos e dinâmicos (tecimento)

O diâmetro do bico constritor (que pode ser observado esquematicamente na Figura 2.60, juntamente com o recuo do eletrodo e a DBP) tem papel importante no processo. Diaz [9] considera que, para menores diâmetros constritores, a corrente do arco principal deve ser reduzida devido ao aumento da temperatura do arco, com a intenção de se evitar danificação do bico. Segundo [16], contraditoriamente, a redução do diâmetro constritor resulta em menos calor transferido ao bico constritor.

tor, pois há redução da superfície interna do orifício constritor aquecida por radiação.

Díaz [9] afirma que a largura do cordão está diretamente relacionada com o diâmetro do orifício constritor, no que concorda com [16], onde se mediu aumento da seção térmica do jato plasma sobre a peça com aumento do diâmetro. Segundo [40], a atuação sobre o diâmetro constritor é a forma mais eficiente de se controlar o calor à peça, pois alteração dos demais parâmetros afeta negativamente outros fatores do processo ou têm muito baixa influência sobre o calor efetivamente aportado ao substrato. O mesmo autor afirma que maior calor é aportado à peça para menores diâmetros, devido à maior tensão do arco, e que a eficiência térmica não varia significativamente.

É recomendado em [29] que o diâmetro constritor (grau de constrição) deva ser controlado de modo que não haja sobreaquecimento do pó injetado. Um valor de 4,8 mm foi considerado máximo para o diâmetro constritor, sem que haja comprometimento da abertura do arco piloto por pulsos de alta frequência e alta tensão [9].

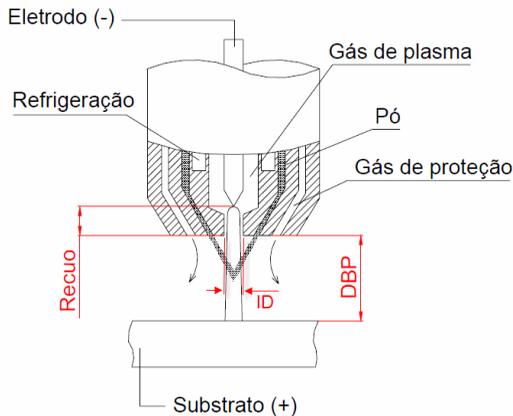


Figura 2.60. Representação esquemática da tocha PTA-P e alguns de seus parâmetros geométricos (ID = diâmetro do bico constritor) [9]

Foram realizados em [1] ensaios de soldagem para verificar a influência do diâmetro do orifício constritor e da distância do ponto focal do pó até a poça (L_{pp}) (alterada por atuação sobre a DBP) na diluição e taxa de deposição. Sob as mesmas condições de soldagem, houve maior taxa de deposição (e maiores tensões de arco) para menores diâmetros

(24 kg/h para diâmetro de 2,5 mm contra 16 kg/h para diâmetro de 5,6 mm) e diluição menor que 5 %.

Em outra bateria de testes, variou-se a distância do ponto focal do pó até a poça de maneira incremental, resultando maior taxa de deposição. De 8,0 mm para 10,0 mm houve redução na diluição de cerca de 7,5 % (média) para menor que 5 %. A partir de 10,0 mm a diluição se manteve menor que 5 %. A maior L_{pp} resulta em maior tensão e maior potência, porém imagina-se que a maior vazão de pó atingível compense esse efeito e não se resulte em grande diluição. Quando a L_{pp} está ainda numa faixa até 8,0 mm, a poça de fusão se encontra em contato com uma região ainda muito quente do plasma, resultando na maior diluição, sem o efeito de compensação. Pode-se levantar essa hipótese com base na observação da fotoespectrometria realizada em [16], Figura 2.61.

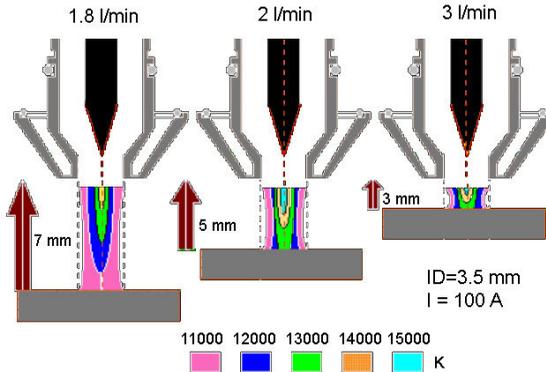


Figura 2.61. Regiões isotérmicas do arco, de acordo com variação da DBP (ID = diâmetro do orifício constritor, I = corrente do arco principal) [16]

A distância bico constritor-peça, neste texto designada por DBP, tem uma faixa operativa (10,0 mm a 15,0 mm, segundo [10]), acima de cujo limite máximo o gás de proteção perde sua eficiência. Hallen [61], por outro lado, determinou uma DBP ótima de 20,0 mm em vazões de pó de 6 kg/h a 10 kg/h. Com esta DBP foram obtidas as menores diluições. Hongyang [1] obteve seus melhores resultados com DBPs maiores que 25,0 mm. Apesar de se encontrar em uma faixa operacional de mais baixa energia e aporte de material, essa informação vai ao encontro dos resultados de [9], onde a penetração se reduziu com o aumento da

DBP, o que pode ocorrer pelo afastamento da peça das isothermas de maior temperatura do arco plasma, provenientes do eletrodo, como na Figura 2.61 anterior. Verificou-se também uma proporcionalidade direta da tensão do arco com a DBP em [9].

O recuo do eletrodo (Figura 2.60) foi variado em [9]. Em relação a 2,4 mm, 0,8 mm resultou em pior acabamento superficial para injeção externa de pó a 60°. Para 30° não houve diferença quanto ao acabamento do cordão. Para ambos os ângulos, entretanto, houve menor eficiência de deposição (maior quantidade de pó não depositado, em relação à quantidade alimentada) para recuo de 0,8 mm. Apesar de o autor não ter idealizado uma hipótese, este fato pode se dever à menor potência do arco, à menor constrição (densidade de corrente) do arco ou ao desvio parcial das partículas de seu trajeto mais adequado até poça (devido a possíveis alterações no comportamento termocinético do pó, como visto no item 2.5).

O movimento de tecimento, ou oscilação da tocha de soldagem, também foi considerado um parâmetro de importância no resultado da solda. Diaz, em [9], relata a obtenção de um cordão mais largo, mas não realiza comparações mais aprofundadas e contundentes com soldagem sem tecimento. Outro aspecto a ser levantado é o agitação da poça metálica, pelo qual o tecimento propicia homogeneidade na dispersão dos elementos de liga no depósito, segundo [12].

A Tabela 2.9 apresenta algumas faixas de regulação dos parâmetros do processo PTA-P. Alguns dos trabalhos omitem alguns dos valores e citam apenas o que foi variado, ou omitem a interdependência entre parâmetros. Portanto a tabela deve ser considerada como informacional, e não como um guia de regulação.

É interessante citar o ponto de vista de Marconi [16] em relação à velocidade de soldagem para soldagem de revestimento, que envolve a maioria das aplicações do PTA-P. Primeiramente, ele coloca que o parâmetro velocidade de soldagem, fundamental para o cálculo do aporte térmico, se refere à velocidade com que se move o campo térmico sobre a peça, ou seja, da tocha de soldagem. Assim, para soldas com tecimento, que caracterizam a maioria das aplicações de revestimento e, em consequência, das aplicações por PTA-P, a velocidade de soldagem pode ser considerada a velocidade transversal da tocha. Esta, para parâmetros usuais de tecimento, praticamente se iguala à velocidade real da tocha (vetorial, V_t , como se vê na Tabela 2.9) e é substancialmente maior que a velocidade longitudinal. Acredita-se que, por esse fato, alguns autores especificam a “velocidade de oscilação” ao invés da frequência de tecimento.

Tabela 2.9. Valores de regulagem encontrados na literatura para os parâmetros da soldagem PTA-P

Parâmetro	Valor	Observações:
DBP	10,0 - 15,0 mm [10]	
	15,0 mm [41]	
	10,0 mm [47]	
	20,0 mm [61]	
Vmpo	15,0 kg/h [25]	(aprox. 250 g/min)
	2,5 kg/h [29]	(aprox. 42 g/min)
	2,0 kg/h [41]	(aprox. 33 g/min)
	1,4 kg/h [9]	(aprox. 23 g/min)
Corrente do arco principal	120 A - 160 A [41]	
	70 A - 250 A [47]	
Corrente do arco piloto	100 A [61]	
	40 A a 50 A [16]	(100 A a 110 A no caso de PSTA)
	14 A [9]	
Vs	4,0 cm / min [41]	
	10,0 cm/min [47]	
	7,8 cm/min [61]	
Velocidade de tecimento	100,0 cm / min [41]	(aprox. 0,8 Hz)
	108,0 cm/min [61]	(aprox. 0,2 Hz)
	50,0 cm/min [16]	(soma vetorial de v_x e v_y): $V_t = (v_x^2 + v_y^2)^{1/2}$; (aprox. 0,4 Hz)
Frequência de tecimento, f	1,5 Hz [9]	
At	10,0 mm [41]	
	40,0 mm [61]	
	10,0 mm [16]	
	7,5 mm [9]	
Vga	4,0 - 5,0 l/min [41]	
	2,0 l/min [47]	
	3,5 l/min [61]	
	5,0 l/min [40]	
	2,8 l/min [16]	
Vgprot	22,0-23,0 l/min [41]	
	15,0 l/min [47]	
	10,0 l/min [61]	
Vgpl	1,2 - 1,5 l / min [41]	
	2,0 l/min [47, 40]	
	4,0 l/min [61]	
	1,6 - 1,8 l/min [11]	

2.11.5. Substrato

Um parâmetro raramente citado é a própria natureza do metal de base, ou substrato. Não obstante, há processos de revestimento convencionais que chegam a 20 % de diluição, demonstrando que a composição química do substrato é relevante para a performance do revestimento.

Relatam-se, em [48], comparações de depósitos PTA-P de uma liga com alto teor de Co e C sobre diferentes aços, quanto à diluição, microestrutura, dureza e resistência ao desgaste. Soldas sobre aço carbono AISI 1020 e aço inoxidável austenítico AISI 304 tiveram menos trincas comparados a substratos de aço inoxidável martensítico AISI 410, sob condições idênticas de soldagem. Depósitos livres de trincas foram obtidos sobre aço carbono sem pré-aquecimento e sobre aço austenítico pré-aquecido. A diluição se reduziu na ordem aço martensítico, aço austenítico e aço carbono, como mostra a Figura 2.62, sem pré-aquecimento da chapa.

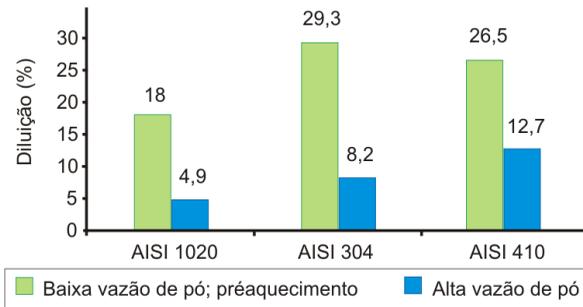


Figura 2.62. Diluição sobre diferentes substratos [48]

Isto foi relacionado à menor condutividade térmica de aços inoxidáveis. Como nestes o calor flui mais lentamente, a taxa de solidificação é afetada, permitindo melhor mistura entre os metais fundidos, além do fato de que, durante o resfriamento, mecanismos de difusão podem operar por mais tempo.

2.12. Ligas metálicas em pó

2.12.1. Granulometria

Ligas metálicas em pó para deposição por PTA-P devem apresentar determinadas características tecnológicas que tornem seu processamento viável. A primeira a ser colocada diz respeito à granulometria. Sua determinação padronizada se faz através do peneiramento de 100,0 g de pó, em peneiras normalizadas de diversas aberturas de malha, e a separação estatística mássica, num histograma, de partículas de determinados diâmetros em torno de um valor médio [16]. O exemplo da Figura 2.63 mostra uma faixa granulométrica de 100 μm a 160 μm .

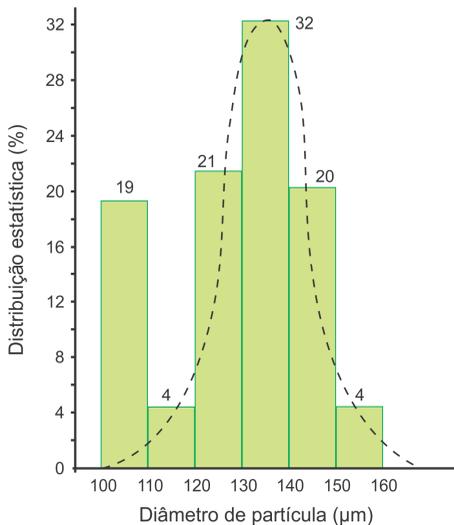


Figura 2.63. Histograma de faixa granulométrica [16]

Segundo [25] para soldagem de materiais ferrosos, deve ser dada preferência a partículas na faixa 60 μm a 200 μm que geram reduzidos vapores metálicos, os quais, em excesso, poderiam trazer prejuízos aos resultados (conforme visto no item 2.5). Em [16] recomenda-se que se evitem tanto partículas muito grandes (acima de 150 μm), que não fundiriam por completo, como muito pequenas (abaixo de 63 μm), que são superaquecidas e, em decorrência, fortemente oxidadas. Na literatura se faz alusão a diferentes faixas granulométricas, porém com limites simi-

lares: de 80 mesh a 325 mesh (44 μm a 180 μm) em [37, 38], por exemplo (conversão de Mesh para μm na Tabela 2.10.). [10] coloca a faixa entre 50 μm e 150 μm , pois fora desta faixa há problemas de alimentação. Em [43], que investigou HPTA, a justificativa também é um comportamento contínuo e repetitivo da alimentação, mas a faixa recomendada é 100 μm a 200 μm . Na aplicação prática de [39], a granulometria utilizada foi acima de 60 mesh (ou abaixo de 250 μm). Conclui-se que, para diferentes faixas de alimentação e diferentes materiais (em [43], por exemplo, foi utilizado pó de aço super duplex, enquanto em [39], Stellite 6 $\text{\textcircled{R}}$) as condições se alterem moderadamente. De fato, [31] sugere que para a seleção tanto dos parâmetros de soldagem, como também do tamanho das partículas, o comportamento térmico de cada pó sob condições de soldagem PTA-P devem ser analisados.

Tabela 2.10. Conversão de unidades de granulometria de pós

Mesh ASTM E11	μm (diâmetro da partícula)
60	250
80	180
100	150
120	125
140	106
170	90
200	75
230	63
270	53
325	45
400	38

Apesar da faixa recomendada na maioria dos artigos da literatura, em [59] foi utilizada liga de Inconel $\text{\textcircled{R}}$ com faixa granulométrica de 200 mesh a 325 mesh (45 μm a 75 μm), para aplicação submarina. Em experiências do LABSOLDA com um ADP de desenvolvimento próprio, foi possível alimentação de pó na faixa de 11 μm a 45 μm (AISI 316 L), como será reportado posteriormente. Outra constatação prática do LABSOLDA é que pós triturados e misturados, com faixa granulométrica muito alta e morfologias irregulares podem levar a entupimento dos canais injetores de pó, por partículas semi-fundidas aderentes (testes no escopo de [49]).

2.12.2. Densidade

Em relação à densidade do material, partículas muito leves sofrem um “espalhamento” no arco, como foi reportado para o caso de revestimento de alumínio com ligas duras, causando piora na proteção do gás sobre a poça metálica, prejudicando o acabamento superficial (SiC, com menor massa específica, obteve faixa mais estreita de tolerância da vazão do pó que TiC e NbC) [52]. Assim, aparentemente, para ligas de menor densidade os valores de vazão de gás devem ser verificados em caso de dano à qualidade da solda, com o intuito de melhorar a alimentação.

Geralmente, ao se abordar os pós para processamento por PTA-P, se fala em densidade aparente, que consiste no quociente entre a massa do pó e o respectivo volume ocupado, dependendo, portanto, não só da composição química, mas também da granulometria e morfologia [16].

2.12.3. Processos de fabricação e morfologia

No que tange ao processo de fabricação, existem a atomização e o tritramento. A atomização consiste na fusão da liga em um cadinho, seguida pela queda do metal líquido por um ou mais bocais verticais. Esse veio líquido é rasgado por um violento jato de ar, água, vapor ou gases (inertes ou não). As gotas metálicas assim formadas solidificam durante a queda dentro de outro recipiente e são refrigeradas na sua base. Depois de secas, são peneiradas para separação. A forma e distribuição dimensional das partículas podem ser reguladas pelos parâmetros de atomização, como temperatura, pressão, ângulo do jato e meio de atomização, sendo que se podem adicionar componentes que atuam na tensão superficial, estimulando a formação esférica. Para PTA-P é utilizado gás inerte, que também favorece a formação esférica. Neste caso a distância percorrida pela partícula até a solidificação é maior que no caso de atomização com água. Assim a tensão superficial tem tempo de atuar, fomentando o formato esférico, enquanto o jateamento com água resulta em solidificação muito rápida, o que mantém a forma irregular do grão [16]. A Figura 2.64 mostra esquematicamente o processo.

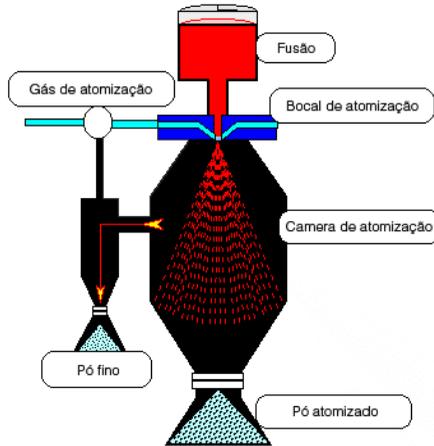


Figura 2.64. Processo de atomização de liga metálica [16]

A Figura 2.65 mostra os pós de Cr, Cu e Ni aplicados em revestimentos sobre substrato à base de Al. O pó de Cr é fabricado por trituração, enquanto os de Ni e Cu são atomizados [36].

Pós atomizados em água tem mais cantos e, assim, absorvem mais umidade ([36, 38]) e fluem pior que pós atomizados em gás inerte, de forma esférica [10, 16, 38], além de apresentarem maior oxidação no processo de fabricação [16]. Dilthey [22] relata dificuldades para soldagem com pós atomizados em água, devido a forte geração e emissão de gases do material. Pós triturados acarretam em problemas semelhantes [16]. Pós à base de VC atomizados em gás inerte obtiveram soldas sem defeitos e com baixa diluição, em resultados de [23]. Já o pó oriundo de atomização em água não permitiu cordões livres de porosidade.

Mostra-se, em [39], que atomização com N_2 pode trazer bons resultados em termos de regularidade na geometria do pó. Porém, excesso de N_2 na atomização causa baixa qualidade superficial das partículas, aumentando o risco de prejuízo à solda.

Em relação ao custo, de acordo com [10] e [16], a produção de pós por atomização a gás é mais cara, devido ao alto preço dos gases.

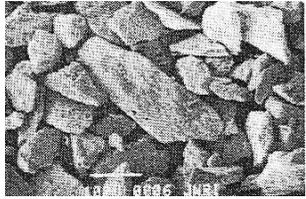
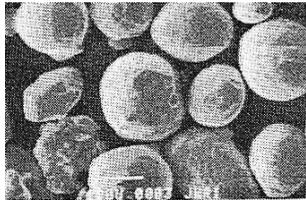
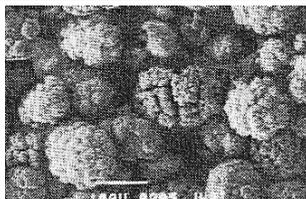
Material	Tamanho (μm)	Morfologia (MEV)
Cr	50 - 100	
Cu	43 - 50	
Ni	65 - 150	

Figura 2.65. Tamanho de grão e morfologia dos pós metálicos [36]

No contexto de [36] foi investigado a fundo o efeito da morfologia do pó na geração de porosidade. Foi executada a análise de gás residual nos poros através de espectroscopia de massa, através da qual foram encontrados resíduos de CO_2 , N_2 , H_2O e H_2 . Conclui-se que a origem do N_2 é ar atmosférico que penetrou o gás de proteção. Mas o maior agente causador de porosidade é o H_2 . Sua origem são materiais orgânicos e água absorvidos no metal de base e de adição. E o estudo conclui que a origem dominante é a água (H_2O) absorvida na superfície do pó. Esta afirmação é apoiada pela investigação da morfologia dos pós utilizados: Cu, esférico (Figura 2.65), apresentou baixa porosidade. Os pós de Ni e Cr, com geometria angulosa e irregular, e, portanto, vários sítios para retenção de H_2O , apresentaram elevada porosidade.

Recomenda-se, finalmente, que as partículas tenham a composição da liga (pós pré-ligados), preferencialmente à mistura mecânica de pós. Desta maneira se garante uma fusão homogênea do material de aporte e maior eficiência no controle das características do revestimento [16].

2.12.4. Armazenamento e secagem

Às condições de armazenagem de ligas em pó deve ser dada atenção, assim como é feito para arames e eletrodos revestidos. Neste campo, diferentes recomendações são fornecidas. Segundo [19] e [38], um aquecimento dos pós em forno entre 120° C e 150° C garante a desumidificação. Como descrito no item 2.4.2, alguns fabricantes incorporam um aquecedor ao silo do ADP, para aquecimento do pó, sem, no entanto, mencionar as temperaturas. Secagem em vácuo a 20° C durante 24 horas foi realizada em [36] com a intenção de eliminar porosidade no revestimento com pós de Ni, Cr e Cu sobre substrato à base de Al. Todavia, este procedimento não teve efeito significativo na redução de poros.

2.12.5. Custo

Em se tratando de preço, o artigo [38], de 1978, cita um preço de US\$ 20,00 por kg de liga de Co, representando 30 % a menos que vareta ou arame para mesma composição. Atualmente, em fornecimento nacional de material importado, se comercializa (para fins de pesquisa) o pó para PTA-P da liga de Co Stellite 6® a aprox. 55 % do preço da mesma liga em arame, por kg. Estes preços são relativos a determinadas condições de fornecimento, no varejo e pequenas quantidades, mas uma estimativa da diferença já é percebida. [27] e [39], ambas fontes de 1980, mencionam que, àquela época, o alto custo das ligas de Co já era uma preocupação, o que levou ao início do desenvolvimento de ligas com menor teor ou nenhum Co para as mesmas aplicações. Ligas com pouco Co custavam de 30% a 40% menos, e ligas sem Co, de 60% a 80% [27] menos. Em um trabalho realizado pela equipe de metalurgia do LABSOLDA [49], o objetivo de formular uma liga em pó para PTA-P resistente à cavitação foi impulsionada pelo mesmo motivo, entre outras justificativas. A Figura 2.66 mostra o desempenho da liga resultante de [49] em ensaio de cavitação acelerada em relação a outras ligas. O melhoramento dessa liga é meta de um projeto atual do LABSOLDA com uma multinacional do setor de geração de energia e de uma tese de doutorado.

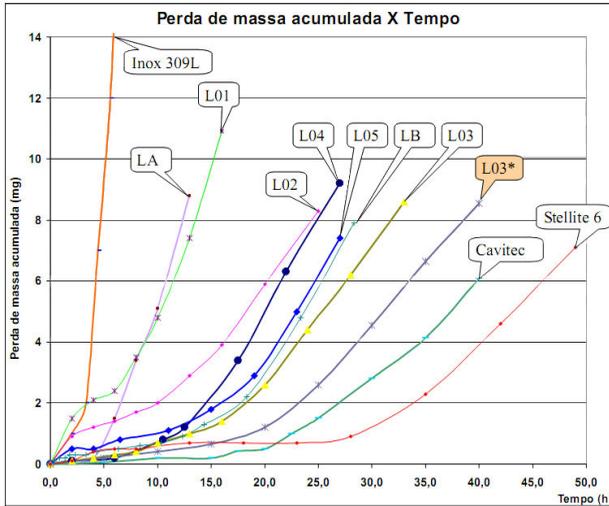


Figura 2.66. Resistência à cavitação de diferentes ligas metálicas anti-cavitação, depositadas pelos processos MIG/MAG e PTA-P [49]

2.12.6. Composição química

Em relação à composição química, é apresentada em [25] uma lista de ligas aplicadas em PTA-P (complementada por listas de outros trabalhos):

- Ligas de alumínio (também em [18]);
- Ferro e suas ligas (também em [27]);
- Cobalto e suas ligas (também em [27, 29]);
- Cobre e suas ligas ((sobre alumínio [27, 36]; bronze sobre ferro fundido GGG40 [33]);
- Molibdênio e suas ligas;
- Níquel e suas ligas (para ferro fundido; sobre alumínio [27, 29, 36]);
- Titânio e suas ligas;
- Carboneto de tungstênio em matriz metálica (também em [24]);
- Zircônio e suas ligas.

A mesma fonte, [25], chama atenção para a impossibilidade de utilização, para PTA-P, de pós de baixo ponto de vaporização, como Zinco, por causa das altas temperaturas do plasma (> 15000 K, aprox.

14700° C). Em [27], a limitação de soldagem por PTA-P se estende a cerâmicas, óxidos, materiais refratários, materiais muito reativos como titânio, e alumínio. Quanto ao último material, no entanto, a informação vai de encontro à experiência de outros autores, como [18] e [25]. Além disso, outros trabalhos da literatura abordam aplicações de cerâmica [10, 31, 85], e ligas de Vanádio [23, 26].

2.12.7. Escoabilidade

A propriedade chamada escoabilidade possui influência significativa nas características da alimentação. Sua unidade é s/50g e equivale ao tempo necessário para que 50,0 g de determinado pó escoe através de um funil padronizado [16]. As características padronizadas do funil estão descritas no Capítulo 4 deste texto.

A geometria do pó influencia a escoabilidade, tendo reflexos sobre a taxa de alimentação [16, 39], de modo que pós atomizados a gás esféricos têm melhor escoabilidade [10, 16]. Para granulometrias muito baixas, entretanto, mesmo os esféricos possuem escoabilidade reduzida [16]. Alguns valores de escoabilidade são apresentados na Tabela 2.11. Ribeiro [49] introduz o conceito de “ângulo de empilhamento” como indicativo da capacidade do pó em fluir (que ele chama em seu texto de “escoabilidade”), mas não fornece a metodologia de medição e princípios físicos. Como não foram encontradas alusões a este conceito em outras fontes da literatura para PTA-P, se abriu mão de sua abordagem no presente trabalho.

Tabela 2.11. Escoabilidade de pós para PTA-P ([94] faz a ressalva de que os valores podem variar de acordo com a composição química da liga)

Faixa granulométrica	Escoabilidade
60 mesh a 325 mesh (45 µm a 250 µm)	9,5 a 13 seg/50g [13]
50 µm a 150 µm	14,0 a 14,6 seg/50g [94]
63 µm a 180 µm	14,8 a 15,5 seg/50g [94]
42 µm a 125 µm	14,4 a 15,0 seg/50g [94]

A experiência do LABSOLDA mostra que pós de mesma composição, porém com diferentes morfologias, necessitam de regulagens

diferentes no ADP para manutenção da mesma taxa de alimentação, o que também foi observado em [16].

2.13. Gases do processo PTA-P

O processo de soldagem PTA-P aplica, fundamentalmente, três fluxos de gás que o caracterizam: gás de plasma, gás de proteção e gás de arraste de pó. Os gases do processo podem ser manipulados para obtenção de diferentes temperaturas e entalpias no plasma, o que torna possível influenciar a densidade de energia, a penetração e a taxa de fusão [25]. Espera-se encontrar influência também sobre a diluição e sobre o aporte de calor efetivo à peça, advindo tanto de aquecimento anódico, como de convecção e energia de recombinação de gases moleculares.

Quanto à escolha dos gases ou misturas a se utilizar em revestimentos soldados por PTA-P existe uma profusão de opções, assim como de efeitos desejados. A decisão depende dos materiais envolvidos e da tarefa a ser realizada. O gás de plasma, que envolve o eletrodo de tungstênio deve sabidamente ser inerte, sendo usualmente escolhido o Ar. Em [20] foi realizada uma tentativa de adição de He no gás de plasma para verificação de possíveis influências. Como não foi possível acender o arco principal (nesse caso por pulsos de alta frequência entre o eletrodo e a peça), o autor exclui este gás (e suas misturas com Ar) de seus ensaios posteriores. Por outro lado, o autor cita que pequenas adições de H₂ no gás de plasma podem trazer aumento da velocidade de soldagem. Já em [62], a utilização da mistura Ar 60 % / He 40 % é altamente recomendada para proteger as superfícies inferiores da tocha contra adesão de partículas semi-fundidas do metal adicionado. A explicação do fenômeno se baseia no fato de que um plasma de maior temperatura (causado pela adição de He) fomenta a produção de um filme autorenovante de vapor metálico condensado e óxidos metálicos nas superfícies inferiores da tocha, o qual atua como barreira anti-adesiva entre as partículas de pó e a tocha. A utilização de um gás de proteção com H₂ (de propriedades redutoras) em sua composição está atrelada ao mecanismo. Imagina-se que a mistura com H₂ impeça deposição exacerbada de óxidos na tocha. Para o gás de arraste se utiliza também a mistura de Ar e He.

Argônio (Ar) e misturas de argônio e hidrogênio (H₂) são comumente mencionadas como gás de proteção [10, 16, 25, 27, 29], sendo que em [11], se reporta que uma porcentagem de 2% a 8% de H₂ é res-

ponsável por promover uma solda esteticamente mais limpa, devido à propriedade redutora deste gás. Segundo [37], o uso de Ar resulta em menor perda de elementos de liga no depósito. Mas o Hélio (He) também aparece em algumas pesquisas [10,16, 18 para alumínio,].

Para avaliação da influência do gás de proteção na pressão do arco sobre a poça e na densidade de corrente, foi lançado mão, em [68], de cálculos pelo método de elementos finitos por intermédio de software de modelamento e simulação. Devido ao alto calor específico e alta condutividade térmica do N_2 e devido ao alto potencial de ionização e alta condutividade térmica do He, esses gases provocam uma “focalização” do arco pelo resfriamento da superfície externa do mesmo. A maior densidade de corrente, no entanto, não se traduz obrigatoriamente em maior pressão sobre a poça (e conseqüentemente maior penetração), como se observa na Figura 2.67. Para o He, a viscosidade é relativamente alta para temperaturas entre 10000 K e 20000 K (aprox. 9700° C e 19700° C), o que resulta em baixa velocidade do jato plasma e conseqüente menor pressão sobre a poça. Em trabalho posterior [95], o grupo de pesquisa do mesmo autor exhibe a simulação das velocidades e temperaturas, numa comparação direta do Ar e He como gases de proteção (Figura 2.68) para o processo TIG.

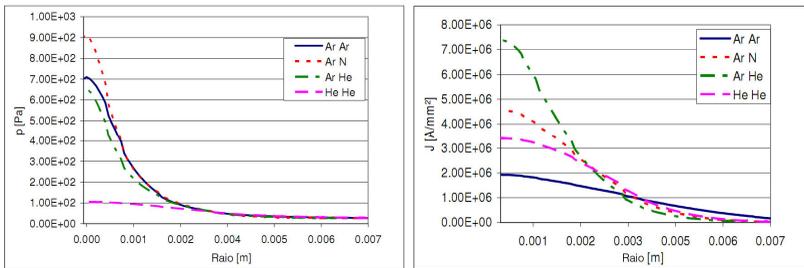


Figura 2.67. Influência da composição do gás de proteção sobre a pressão do arco e a densidade de corrente (Condições de simulação apresentadas: $I = 120$ A, $V_{gpl} = 0,3$ l/min, $V_{gprot} = 9,0$ l/min, DBP = 10 mm) [68]

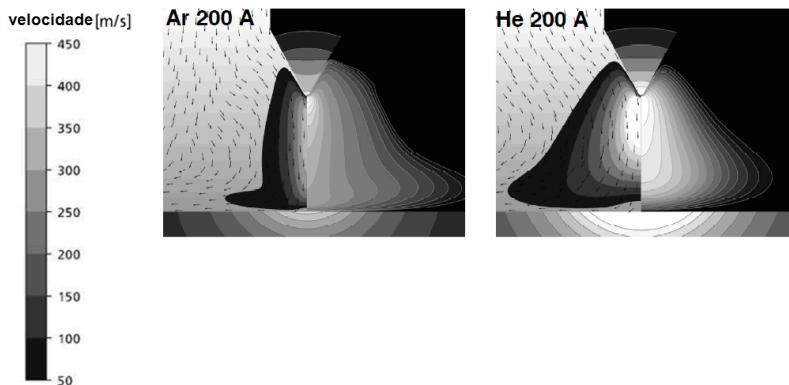


Figura 2.68. Velocidades para Ar e He como gases de proteção no processo TIG (à esquerda: perfil de velocidades; à direita, perfil de temperaturas) [95]

As condições anteriores eram relativas ao processo Plasma normal, servindo como base para o conhecimento do comportamento do arco. Para o PTA-P em específico, a Figura 2.69 mostra o estrangulamento das isotermas próximo à poça, em decorrência da injeção de gás de arraste / pó. É interessante neste ponto comparar os perfis das isotermas desta figura com a Figura 2.58, apresentada anteriormente, que demonstram certa congruência. Apesar de a geometria das isotermas ser diferente, os valores de temperatura por região do arco são similares. (As diferenças podem advir das diferentes condições de soldagem, medição e simulação, além dos erros de cada método.)

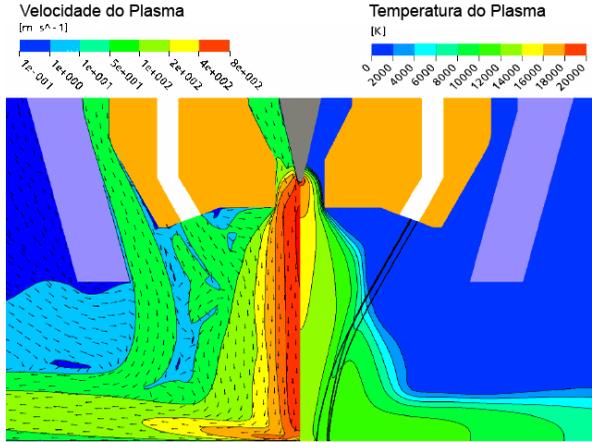


Figura 2.69. Modelo da tocha, perfis de velocidades e temperaturas do plasma para o processo PTA-P (condições não apresentadas) [69]

Como gás de arraste de pó, o mais citado é Ar [11, 16, 25, 27, 37], mas também se utilizam o nitrogênio (N_2) [25], o He [27, 39] e mistura de Ar e H_2 [10]. He seria uma boa opção, segundo Dolles, para o gás de arraste devido ao seu alto potencial de ionização sem, entretanto, comentar o efeito benéfico disso [20]. Mas a baixa densidade do He exigiria acréscimo de vazão para um carreamento consistente do pó, o que teria como consequência velocidade excessiva na sua saída em direção ao arco, perturbando-o. O autor coloca ainda o alto custo do He como agente inibidor de sua aplicação e recomenda mistura de Ar e H_2 , por suas propriedades redutoras. Pode-se ir, de fato, além e pensar no gás de arraste como agente ativo nas propriedades da solda, como a própria Figura 2.69 anteriormente mostra. Misturas com H_2 e He ou He puro são recomendadas em [17], resultando em melhor acabamento. Estes gases resultam em maior potência de arco para a mesma corrente de soldagem e asseguram um arco suave e com boa molhabilidade. De qualquer maneira, o autor deixa claro que se podem manipular as misturas, as quais podem ser adequadas para ligas difíceis de soldar, que possuem baixa fluidez.

3. OBJETIVOS E METAS

De maneira global, o presente trabalho objetiva o aprimoramento do conhecimento sobre o PTA-P e a geração de inovações técnico-científicas no processo, com vistas à viabilização de sua introdução em aplicações de revestimento nos setores de Geração de Energia Elétrica e de Petróleo e Gás. Ou seja, visa-se tecnologia robusta e compacta (boa mobilidade em ambientes de campo), aplicabilidade manual, e capacidade de aplicação em todas as posições de soldagem. Redução de custos, aumento da qualidade e produtividade são as forças motrizes para a introdução do PTA-P em novas operações, assim como na substituição de outros processos de revestimento que já são utilizados. As vantagens atribuídas ao PTA-P que justificam seu desenvolvimento e consecutiva assimilação na indústria são detalhadas no primeiro e segundo capítulos deste texto e no esquema da Figura 3.1.

Para que se possibilite o alcance do objetivo geral, diversas metas ou objetivos específicos devem ser vencidos. Em se tratando de um processo de soldagem a arco com adição de material, são diversos os campos de conhecimento envolvidos em maiores ou menores parcelas. Portanto, a primeira meta é definir uma equipe interdisciplinar a atuar no projeto que possua as competências necessárias, com pessoal com know-how em eletrônica, projeto mecânico, informática, automação e metalurgia, que dará suporte nas tarefas relacionadas aos diferentes flancos de atuação. Esta interação, de maneira adequadamente gerenciada, possibilita não somente maior agilidade e criatividade na concepção, design e condução de ensaios científicos, mas também num maior potencial de reais inovações tecnológicas ao longo da pesquisa.

Em termos do processo em si, visa-se verificar a possibilidade de utilização do arco não transferido como fonte significativa de calor para a fusão do pó, aumentando esta taxa sem acarretar em grandes variações na diluição (PTA-P Combinado). Ainda no âmbito de inovações no processo, objetiva-se implementar a pulsação da vazão mássica de pó, com a finalidade de acompanhar a pulsação da corrente do arco principal e/ou do arco piloto, como acontece analogamente no processo MIG Pulsado com Pulsação Térmica, no qual a velocidade de arame pulsa em sincronia com a corrente média. No caso do PTA-P existe uma vantagem, pois se pode lançar mão de defasagens entre os tempos de pulso e base, que podem vir a trazer benefícios aos resultados.

No que tange a inovações nos componentes do sistema, pretende-se atuar em duas vertentes. Quanto à tocha de soldagem, há de se definir sua geometria e sistema de funcionamento em relação à alimentação de

pó ao arco (externa, interna ou central) de acordo com o exposto no Capítulo 2, além do sistema de refrigeração (dupla ou única). Melhorias de projeto, visando facilidade de fabricação e utilização (troca de peças de reposição, por exemplo) também serão abordadas. De acordo com as aplicações em vista, em grande parte manuais e sobre peças com desgaste irregular, se objetiva a programação de comandos (botões) no punho da tocha, os quais permitirão ao soldador, além do disparo da solda, atuação online sobre variáveis de soldagem. Necessidades de refusão (ausência de adição de pó) podem ser satisfeitas com este sistema.

A segunda vertente aborda o Alimentador de Pó (ADP). Necessidades de alterações no sistema desenvolvido em [9] originaram-se quando testes dinâmicos de resposta sob condições diversas mostraram descontinuidades na vazão de pó resultante. Portanto, também consiste numa meta intermediária o desenvolvimento de um ADP que apresente regularidade, repetitividade e capacidade de alimentação a soldas na posição sobrecabeça. Neste caso, uma grande carga de inovação se observa na intenção de que esse ADP disponha de controle realimentado. Ou seja, visa-se desenvolver um sistema de monitoração da vazão de pó que realmente o atuador do ADP (através do software de controle), melhorando a regularidade neste parâmetro do processo, visto que perturbações podem se originar de inclinações do silo, vibrações, morfologia do pó, desgaste de componentes, etc. O sistema de monitoração também é útil em atividades de P&D e calibração de sistemas, com acontece com outros processos de soldagem.

O sistema desenvolvido em [9], incluindo hardware e software, apresenta flexibilidade quanto à regulagem de diversos parâmetros do processo PTA-P. Uma das metas aqui previstas é o melhoramento do software. Este deve incorporar o controle dos parâmetros a serem adicionados (arco piloto, vazão e pulsação do pó), além de todos os componentes do sistema, respondendo ao disparo da solda pelo soldador, à realimentação incorporada ao sistema (controle da vazão de pó) e às regulagens realizadas online pelo soldador via botões na própria tocha.

A partir do sistema físico definido, se objetiva o mapeamento de parâmetros e variáveis do processo, por intermédio de ensaios práticos, que gerarão conhecimento básico sobre o comportamento do processo sob diversas condições, como diferentes misturas gasosas, posições de soldagem, características do material em pó, tipo de tocha de soldagem, entre outras. Este *know-how* gerado norteará a formulação de procedimentos de soldagem dedicados a aplicações específicas. As condições de contorno de importância para esta meta são a natureza da aplicação

(manual, automática), a posição de soldagem, a liga metálica a ser depositada e o substrato.

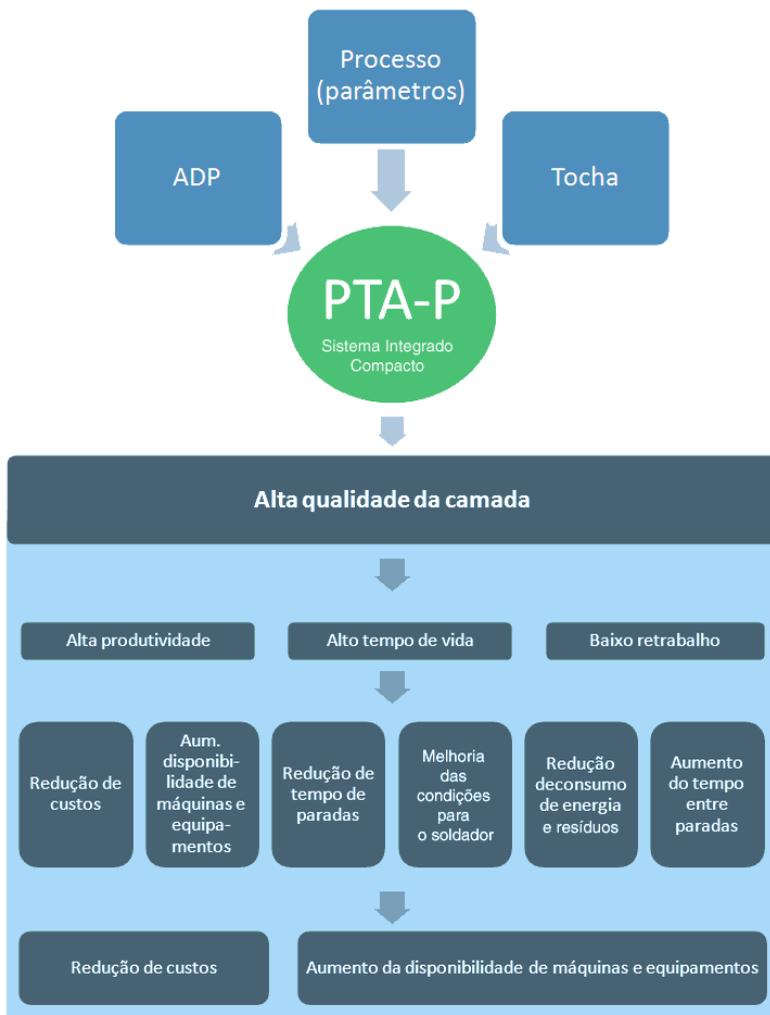


Figura 3.1. De cima para baixo, com níveis em diferentes padrões de cor: metas, objetivo global, justificativas (algumas justificativas se repetem em diferentes níveis, por serem conseqüências de outras)

4. EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Equipamentos¹

O presente trabalho dá continuidade a uma linha de pesquisa antes já iniciada no LABSOLDA. Na primeira incursão no processo PTA-P, a qual teve como fruto uma tese de doutorado [9], foram realizadas inovações no equipamento, avaliação prévia do desempenho fora de posição e um mapeamento das influências de alguns parâmetros sobre o processo, como visto no Capítulo 2.

Em assim sendo, a bancada de ensaios foi parcialmente absorvida pelo presente trabalho, que recebeu continuamente novos equipamentos e instrumentos. Estes foram selecionados no mercado (que é restrito), ou então projetados e construídos pela própria equipe do laboratório.

4.1.1. Fontes de Energia

A fonte utilizada para o arco principal é do modelo INVERSAL 450, de fabricação da empresa brasileira IMC Soldagem. É uma fonte eletrônica multiprocesso, transistorizada, chaveada no secundário do transformador da estrutura de potência, controlada remotamente via microcomputador.

Para o arco piloto, uma das fontes foi do modelo Módulo Plasma, da IMC Soldagem, atuando com uma corrente fixa de 14 A. Esta máquina possui um transistor atuando depois do secundário do transformador, na região linear. A fonte incorpora o componente denominado ignitor de alta frequência, subsistema que gera pulsos de elevada tensão e pequeno tempo capazes de ionizar parte do gás de plasma e, então, estabelecer o arco piloto entre a ponta do eletrodo e a superfície interna do orifício do bico constritor. A outra fonte utilizada para o arco piloto é do modelo LARRY FLEX, também da IMC Soldagem e com ignitor de alta frequência. Esta é uma fonte de soldagem inversora (chaveada no primário do transformador), que não é exclusiva para a função de arco piloto na soldagem Plasma. Portanto, tem regulagem de corrente, o que permite a investigação da influência da intensidade da mesma sobre o processo de soldagem.

¹ Especificações dos equipamentos podem ser encontradas nos websites dos respectivos fabricantes

A Figura 4.1 mostra as fontes de soldagem utilizadas.



IMC Inversal 450 – arco principal



IMC Larry Flex – arco não trans-ferido – arco piloto



IMC Módulo Plasma – arco piloto

Figura 4.1. Fontes de Soldagem

4.1.2. Tochas de Soldagem

A tocha PTS3, com alimentação externa, sistema de refrigeração com dois circuitos e 4 orifícios injetores de pó, construída no próprio LABSOLDA, foi aplicada na maioria dos ensaios.

A fim de introduzir outro princípio de injeção de material no escopo do projeto, foi adquirida uma tocha PP-6-01, de fabricação ucraniana da Plasma Master. Esta tocha utiliza a injeção interna de pó, conforme descrito no Capítulo 2. As tochas podem ser vistas na Figura 4.2.

Utilizou-se, para todos os ensaios, eletrodo de W com 2 % de óxido de tório em sua composição. O ângulo da ponta foi mantido em 30°.



PP-6-01	PTS3
injeção interna	injeção externa
Capacidade: 350 A @ 100%	Capacidade: 350 A @ 100%
Circuito de refrigeração único	Birefrigerada

Figura 4.2. Tochas PTA-P

4.1.3. Alimentadores de Pó

Uma das etapas do presente trabalho focou a tentativa de se sobrepujar falhas encontradas no comportamento do ADP utilizado em [9], realizando alterações no mesmo. Trata-se de um dosador de material granulado do tipo fuso transportador, da Figura 4.3. Estas tentativas, assim como outros princípios, serão comentados no próximo capítulo.

O equipamento PM-PF-10, dosador de pó do tipo válvula rotativa da Plasma Master, foi adquirido e testado, juntamente com sua unidade de controle. Ambos também são mostrados na Figura 4.3



Figura 4.3. ADP desenvolvido em [9] (esquerda) e alimentador de pó para PTA-P comercial (direita)

4.1.4. Acessórios

O misturador de gases da marca alemã WITT modelo customizado KM 30 5M permite a mistura de até cinco gases ao mesmo tempo (Ar, He, N₂, H₂, CO₂) fornecendo alta flexibilidade aos ensaios e possibilidade de verificação de várias condições encontradas na literatura, para diferentes materiais.

Também fazem parte da bancada dois controladores de vazão de gás, baseados em válvulas de controle da vazão mássica modelo GFCS-010212 da empresa Aalborg. A faixa de regulagem é de 0 a 5 l/min. Um deles controla a vazão do gás de plasma e o outro do gás de pressurização do ADP, ou do gás de fluidização, como será explicado posteriormente.

Para medição do gás de proteção se utilizou um instrumento programável que contém uma válvula de medição da vazão mássica, modelo MVG 3, desenvolvido pelo LABSOLDA, cuja faixa de medição é de 0 a 20 l/min. Para os controladores de vazão de gás foram desenvolvidos circuitos e interfaces para integração dos instrumentos ao software de controle global do sistema PTA-P.

Para deslocamento automático da tocha foram utilizados dispositivos projetados pelo LABSOLDA. O Tartflope V2 (duas unidades na bancada) executa movimentação em dois eixos (x, longitudinal à direção da solda, e y, transversal à solda. São possíveis trajetórias planas de tecimento nos modos trapezoidal, triangular e retangular e a regulagem

de tempos de paradas nos extremos da amplitude. Esse dispositivo também é comandado remotamente pelo software de controle global.

Com a finalidade de se flexibilizar a bancada em termos de configurações de posição relativa entre tocha e substrato, foi projetada e construída uma estrutura metálica que possibilita simulação de todas as posições de soldagem. Nesta estrutura é possível, inclusive, a fixação de uma mesa rotativa com dois graus de liberdade e controle de rotação para soldagem de tubos.

Os equipamentos podem ser visualizados na Figura 4.4.



Misturador de gases
KM 30 5M



Medidor de vazão de
gás MVG -3



Válvula de controle
da vazão mássica
GFCS-010212



Dispositivo de deslocamento automático de tocha Tartflope V2



Bancada flexível

Figura 4.4. Acessórios para soldagem PTA-P

4.1.5. Software de Controle do Processo

Para adequada aplicação do sistema PTA-P integrado, é necessário interfaceamento entre seus elementos. O controle do funcionamento destes é realizado pelo software PLC-1 (Figura 4.5), que, através da placa eletrônica INTERDATA, da empresa IMC Soldagem, controla e comanda os componentes. São possíveis regulagens dos parâmetros,

temporizações, rampas, disparos, desligamento. Esta flexibilidade permite a formulação de diferentes relacionamentos temporais e quantitativos entre os parâmetros, para diferentes condições de soldagem, como diferentes materiais e diferentes posições de soldagem, principalmente no modo automático.

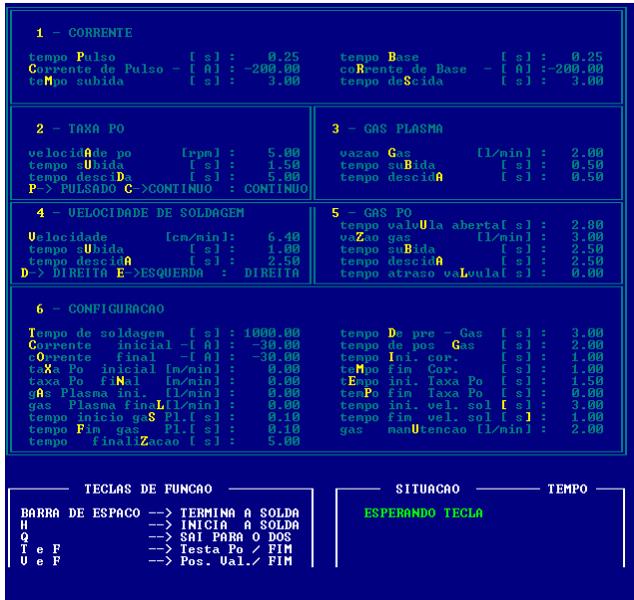
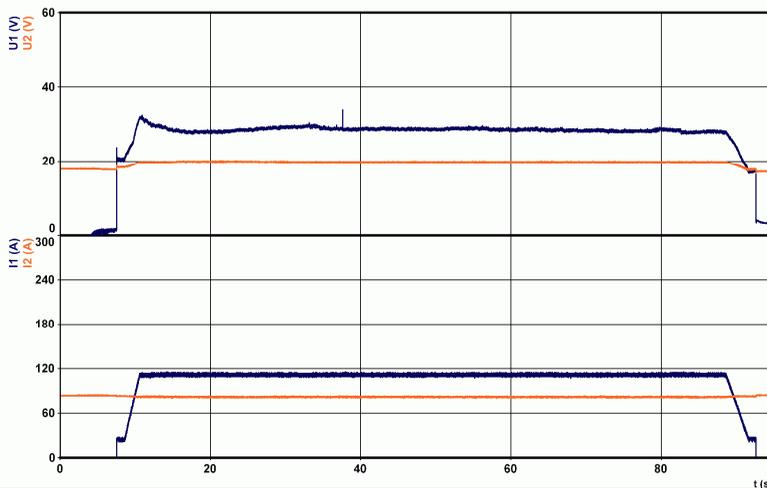


Figura 4.5. Tela do software de controle PLC-1

4.1.6. Instrumentação

Para aquisição e tratamento de dados foi utilizado o SAP, Sistema Portátil de Aquisição de Dados (Figura 4.6), da IMC Soldagem, em uma versão modificada para monitoração de duas fontes de soldagem concomitantemente. Como a influência do arco piloto é objeto de estudo contido no escopo do presente trabalho, a funcionalidade de dupla aquisição sincronizada (arco piloto e arco principal) se fez necessária. O software que roda no equipamento se chama OSCILOS e fornece oscilogramas, histogramas, cálculos de potência, exportação de dados e outras funções.



Corrente		Tensão	
Faixa de aquisição (A)	-600 a 600	Faixa de aquisição (V)	-100 a +100
Frequência de aquisição	5,0 kHz	Frequência de aquisição	5,0 kHz
Erro	2 % da leitura	Erro	1 % da leitura
Resolução (A)	0,8	Resolução (V)	0,1

Figura 4.6. Sistema de aquisição e tratamento de dados SAP, tela do OSCIOS, com medição do arco principal e do arco piloto, exemplo de exportação de dados para análise em outros softwares e características técnicas

4.2. Materiais

4.2.1. Material de Aporte e Substrato

Foram utilizadas chapas de aço carbono 1020 como substrato, com dimensões 12,7 mm x 100,0 mm x 150,0 mm.

A liga metálica em pó utilizada nas investigações foi selecionada com base em aplicações vislumbradas, mas também de acordo com a possibilidade de aquisição rápida. Assim, foram conduzidos testes com o aço inoxidável austenítico 316 L, em diferentes granulometrias. Primordialmente, se utilizou 50 µm - 90 µm. Outros pós eventualmente utilizados serão descritos oportunamente.

A liga 316 L é encontrada em forma atomizada, com granulometrias diversas, como se pode observar na Figura 4.7. A Tabela 4.1 traz sua composição química nominal.

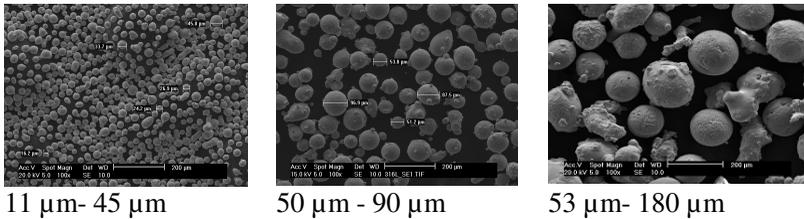


Figura 4.7. Morfologia e granulometria das liga metálica em pó AISI 316 L

Tabela 4.1. Composição química do aço 316 L

	C	Si	Mo	Cr	Mn	Fe	Ni
Composição nominal (%)	0,03	1,00	2,00 - 3,00	16,00 - 18,00	2,00	68,50 (bal.)	11,00-14,50

4.2.2. Gases

Os ensaios envolveram os gases Ar, He, H₂ e N₂ e suas misturas. As composições específicas das misturas serão abordadas no item 5.7 a seguir.

4.3. Ensaio

A partir das informações angariadas na literatura e dos aspectos inovadores que deveriam ser investigados, foi realizado o planejamento experimental para os ensaios de soldagem, preparação e avaliação das soldas e determinação de características dos revestimentos, assim como observação das características dos materiais de adição. Houve também calibração dos alimentadores de pó (ADPs) e verificação do seu comportamento.

4.3.1. Ensaio de soldagem

Preponderantemente foram realizados ensaios automáticos de soldagem, em diversas posições. Os ensaios automáticos objetivaram verificar a influência de parâmetros do processo e o comportamento dos componentes do sistema, isolando-se variações impostas pelo soldador.

Quando pertinente, foram realizados aquisição e tratamento de dados. O tempo dos oscilogramas levado em consideração para medições das variáveis descartou o início e fim da solda, no intuito de se assegurar valores de regime. A parte dos oscilogramas considerada representou os 60,0 mm centrais dos cordões, isolando as rampas de início e fim de solda e os transitórios de entrada e saída do arco das chapas de sacrifício (no caso de ensaios com determinação da massa do cordão). Esse método se baseou em [9]. A Figura 4.8 ilustra o procedimento.

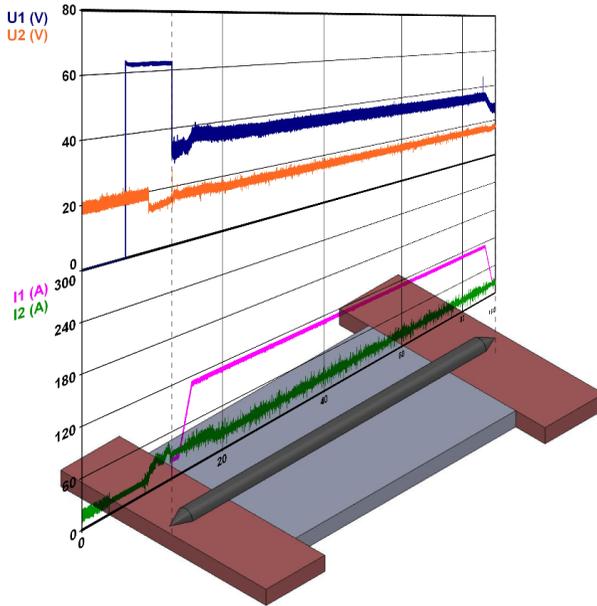


Figura 4.8. Ensaio de soldagem com determinação da massa do cordão - limitação do tempo de aquisição, isolando transitórios e chapas de sacrifício

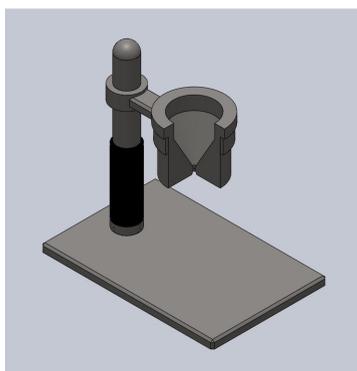
Na Figura 4.8 nota-se, no início do oscilograma, um pulso na corrente do arco piloto (I_2). Este método foi utilizado sempre que o arco principal não abriu espontaneamente, após o tempo de pré gás. No contexto do presente trabalho, isto ainda foi realizado manualmente. Pretende-se incorporar essa funcionalidade no sistema PTA-P a ser projetado.

A variável elétrica de soldagem controlada (independente) é a corrente (I , em A) e, portanto, a tensão (U em V) é a variável dependente.

Anteriormente a cada bateria de ensaios, o alimentador de pó foi submetido ao tempo de entrada em regime, conforme descrito no item 5.1.

4.3.2. Calibração do ADP aos pós metálicos utilizados e medição da escoabilidade

Os pós metálicos apresentam diferentes características de escoabilidade, de acordo com suas propriedades. O dispositivo mostrado na Figura 4.9, baseado em esquema fornecido pela norma ASTM B213 “Standard Test Method for Flow Rate of Metal Powders”[96], foi construído e utilizado para medir o tempo em que 50,0 g de pó escoam através do funil. Através dessa cronometragem, se determina a escoabilidade em s/ 50,0 g. Segundo a norma, a habilidade de fluir de cada material depende do atrito inter-partículas, resultante das propriedades das mesmas; ou seja, quanto maior este atrito, mais lento é o fluxo.



Desenho demonstrativo, em corte



Dispositivo construído

Figura 4.9. Dispositivo (escoômetro) para determinação da escoabilidade em s/50g

A propriedade escoabilidade, juntamente com características de cada ADP, influencia a curva rotação (rpm) x vazão de pó (kg/h) para cada ADP. Portanto, para cada pó utilizado e tipo de ADP, se mediu a massa alimentada em 60 ou 30 segundos de alimentação, após entrada em regime, a fim de se estabelecer esta relação. Esta atividade foi realizada isoladamente, para verificação do funcionamento dos ADPs, e também aleatoriamente (e freqüentemente) nos intervalos entre os ensaios de soldagem. O ADP PM-PF-10 dispõe de uma regulagem adicional, que é a distância entre o canal de queda do pó e o tambor dosador, a qual foi mantida em 1,2 mm.

4.3.3. Verificação da morfologia das partículas

Um fator influente sobre as características de alimentação de pó é a morfologia das partículas, que depende de seu processo de fabricação. Para verificar esta propriedade, foram realizadas fotografias em microscópio eletrônico de varredura (MEV) com ampliação de 100 vezes.

4.3.4. Determinação de características geométricas e diluição do cordão depositado

Para análise geométrica das soldas, as mesmas foram seccionadas transversalmente, ao que se seguiu preparação metalográfica com ataques químicos adequados. O método de dimensionamento adotado baseou-se naquele apresentado em [9], conforme Figura 4.10.

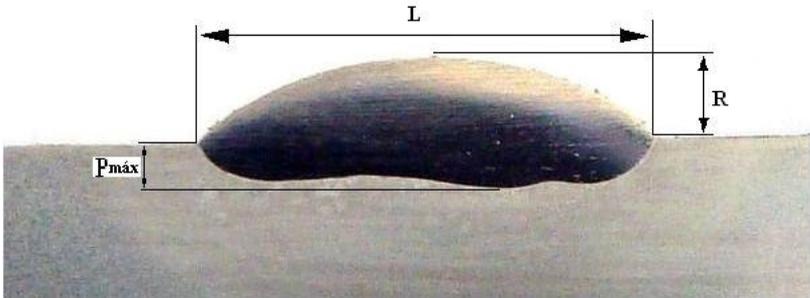


Figura 4.10. Dimensões geométricas do cordão de solda abordadas no presente trabalho

A seção transversal de cada cordão é fotografada e, então, transposta a um software dedicado (Image Tool), como visto na Figura 4.11, adiante. Neste software, é possível a delimitação e cálculo das áreas do metal de solda, da porção do metal de solda advinda da fusão do metal de base e, conseqüentemente a diluição. Este método para cálculo da diluição foi adotado, pois, segundo [48] há concordância entre os valores deste e do método do teor de Fe para depósitos realizados por PTA-P.

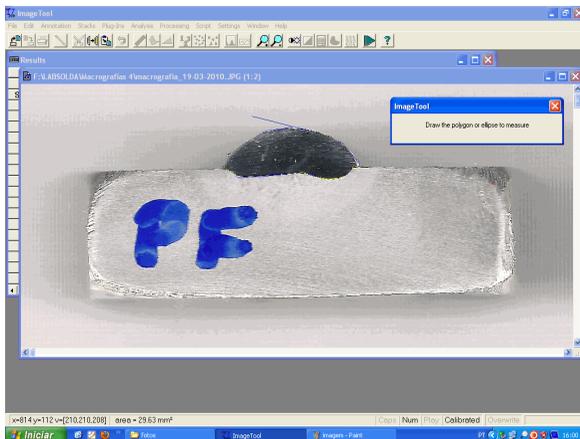


Figura 4.11. Exemplo de uso do software de tratamento de imagens para cálculo da diluição da solda

4.3.5. Análise da composição química e microestrutura na seção transversal do cordão de solda

Alguns dos ensaios realizados objetivaram a determinação da influência dos modos e parâmetros de soldagem sobre a composição química e/ou sua homogeneidade no metal de solda e sobre a microestrutura. Para isso, as amostras foram cortadas transversalmente, preparadas e levadas ao MEV para análise semi-quantitativa da composição química. As medições foram realizadas de acordo com o esquema mostrado na Figura 4.12, sendo a área de cada ponto de medição formada por um retângulo de 500 μm x 900 μm .

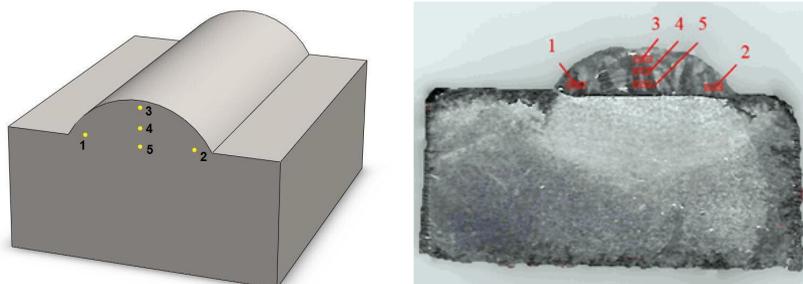


Figura 4.12. Regiões de análise da composição química (MEV)

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Alimentador de Pó

Nessa etapa, o desenvolvimento se baseou no empirismo inspirado em sistemas observados e pesquisados. A literatura não aborda cientificamente o desenvolvimento de ADPs ou seus princípios, de maneira aprofundada. Assim, alguns conceitos construtivos foram investigados, porém análises sistemáticas de desempenho realizadas apenas para aqueles que se mostraram promissores para aplicação no PTA-P (incluindo menor complexidade de projeto, construção e utilização).

Os resultados da análise descrita no item 2.4.2 sobre o alimentador de pó tipo fuso levaram à busca de uma maneira de suprimir as oscilações de alimentação presentes na saída do dispositivo. Adicionalmente à problemática relacionada aos APDs tipo fuso descrita naquele item, Stelling cita em sua tese de doutorado [97] também uma menor capacidade de alimentação em relação ao utilizado por ela, do tipo válvula rotativa.

A idéia inicial, que já levava em consideração o conceito de emulsificação do pó (posteriormente realizada por Fluidização), consistiu na inclusão de um subcomponente na saída do ADP, que realizava vibração mecânica do pó dentro de uma câmara anterior à injeção do fluido gás / pó na linha que o transporta à tocha.

Num primeiro conceito, esse subcomponente consistiu em uma câmara dividida por um diafragma de borracha. A parte superior recebia o pó do ADP verticalmente e, lateralmente, o gás de arraste. A parte inferior possuía uma entrada de ar comprimido e na saída uma válvula pneumática de alívio, a qual causava a vibração do diafragma, conforme a pressão interna subia e era aliviada pela abertura da válvula, devendo suspender o pó em queda. A saída da parte superior da câmara deveria transportar o fluido gás / pó para a tocha. A montagem do sistema pode ser observada na Figura 5.1.



Figura 5.1. ADP com câmara de pulsação

A amplitude e frequência de vibração não se mostraram suficientes para suspender as quantidades de pó alimentadas, e este se acumulou sobre o diafragma. Como o ensaio pretendia verificar o comportamento do aparato, a faixa de alimentação de pó verificada se manteve dentro daquela usualmente utilizada para o PTA-P, ou seja, cerca de 0,5 kg/h até 3,0 kg/h (aprox. 8,0 g/min até 50,0 g/min). A partir de um dos conceitos observados na literatura [74], se tentou melhorar o desempenho deste protótipo pela inserção de um “tubo de turbulência”, dotado de vários orifícios radiais de pequeno diâmetro, que auxiliaria na emulsificação do pó no gás (Figura 5.2). Certa melhora foi observada apenas para vazões de gás de arraste acima de 6,0 l/min, com a saída de pó na extremidade da mangueira de transporte à tocha. O conceito não foi, portanto, aprovado, pois vazões de gás de arraste desta magnitude estão no limite das faixas citadas no item 2.11, além de não se ter eliminado a pulsação na saída.

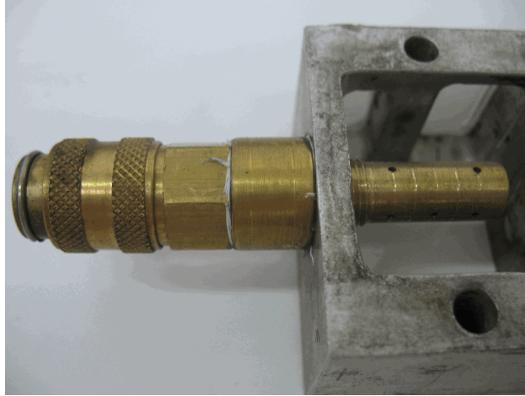


Figura 5.2. Tubo de turbulência inserido na câmara de pulsação

Ainda lançando-se mão do ADP com fuso transportador, se manteve o objetivo de colocar o pó em suspensão antes de ser alimentado à tocha de soldagem. O segundo conceito abordado incorporou a utilização de alto-falantes para a vibração do pó alimentado à câmara intermediária e sua conseqüente suspensão homogênea no gás de arraste. O protótipo construído pode ser observado na Figura 5.3. Foram posicionados dois alto-falantes opostamente, os quais eram alimentados por um gerador de funções e um circuito amplificador, com uma defasagem mútua de 180° . Desta maneira, se evitou a tendência à compressão ou expansão do gás internamente à câmara, o que geraria inerentemente pulsação da vazão de gás de arraste na tocha de soldagem. Os alto-falantes utilizados têm 100 W de potência (menores valores não foram capazes de suspender o pó de 316L), e a pressão na parte posterior e anterior (interior da câmara) de cada alto-falante foi equalizada, de modo que não houvesse contraposição da pressão interna ao movimento das membranas.

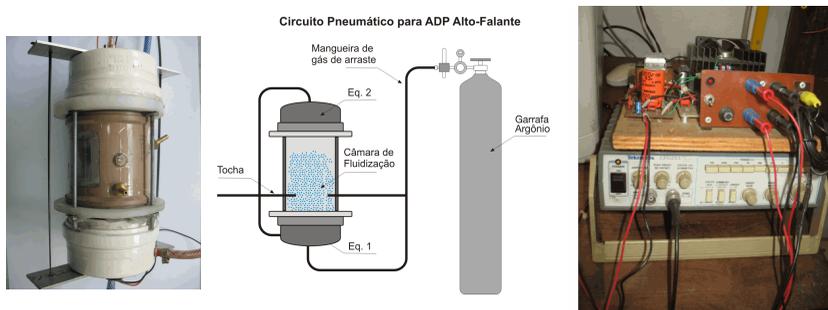


Figura 5.3. Protótipo de câmara de suspensão por alto-falantes, esquema para equalização de pressões e aparato para controle dos alto-falantes

O “tubo de turbulência” também foi aplicado nessa situação. Foi realizada uma varredura de frequência e amplitude de vibração, para uma massa de 25,0 g de pó metálico no interior da câmara. Apesar de se conseguir suspender o pó (parâmetros na Tabela 5.1), a alimentação para a tocha se mostrou insuficiente, sendo perceptível também somente a partir de cerca de 5,0 – 6,0 l/min de gás de arraste, ainda com perceptível pulsação.

Tabela 5.1. Valores para suspensão do pó metálico para PTA-P

Parâmetro	Valor
Vazão de Arraste (l/min)	2,0 – 6,0
Pressão de Arraste (bar)	3,0
Frequência (Hz)	250
Amplitude	¼ de volta (não há escala - gerador de funções Tektronix CFG253)
Massa de pó (g)	25,0

Neste estágio, foi tomada a decisão de se iniciar investigações sobre o conceito de alimentadores do tipo válvula rotativa, devido à sua simplicidade construtiva e larga aplicação no mercado. Foi adquirido, então, um equipamento importado com este princípio de funcionamento e seu desempenho foi analisado quanto à repetitividade e capacidade de alimentar diferentes tipos de pós. Como citado anteriormente, nem sempre os pós metálicos estão disponíveis em uma versão otimizada para o

PTA-P, ou seja, esféricos e com uma granulometria adequada. Um exemplo é a etapa inicial de desenvolvimento de ligas metálicas [49]. Em alguns casos, são primeiramente utilizados pós obtidos por trituração e mistura mecânica, processos mais baratos e rápidos que a atomização da liga.

O ADP comercial PM-PF-10, já mencionado no item 4, apresentou desempenho considerado apropriado (comportamento linear e baixo desvio padrão). A Tabela 5.2 descreve a bateria de ensaios realizados com pó 316 L atomizado em água (fabricação nacional, Figura 5.4) e a Figura 5.5 ilustra os resultados.

Tabela 5.2. Vazão mássica de pó, ADP PM-PF-10, liga 316L atomizada em água

Regulagem (RPM)	Medição1 (g/min)	Medição2 (g/min)	Medição3 (g/min)	média (g/min)	desvio padrão (g/min)	kg/h
1 (0,9)	3,55	2,80	2,8	3,05	0,43	0,18
2 (2,4)	6,65	6,45	6,3	6,47	0,17	0,39
3 (3,8)	11,00	10,00	9,9	10,30	0,61	0,62
4 (5,3)	14,50	14,05	13,8	14,12	0,35	0,85
5 (6,8)	17,45	16,75	16,7	16,97	0,42	1,02
6 (8,2)	20,10	19,75	20,5	20,12	0,37	1,21
7 (9,7)	22,40	22,30	23,2	22,63	0,49	1,36
8 (11,1)	25,15	24,95	25,95	25,35	0,53	1,52
9 (12,6)	28,00	27,70	28,85	28,18	0,59	1,69
10 (14,1)	30,70	30,80	32,05	31,18	0,75	1,87

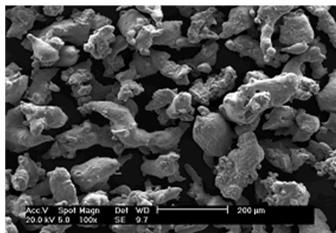


Figura 5.4. Pó 316 L atomizado em água (nota-se não esfericidade), utilizado para análise do ADP comercial

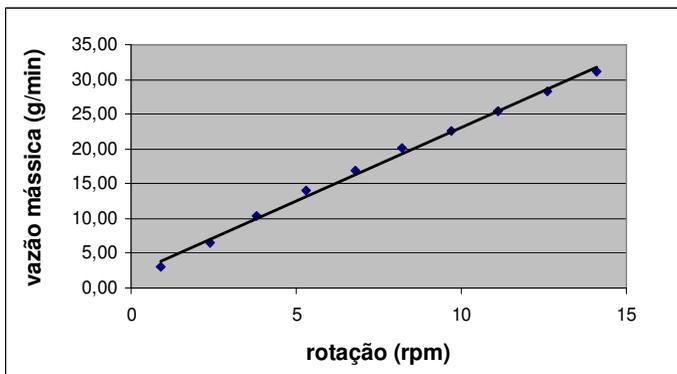


Figura 5.5. Vazão mássica de pó, ADP PM-PF-10, liga 316L atomizada em água (com linha de tendência)

Para a liga LO3* (mistura de pós triturados), apesar de sua morfologia irregular (Figura 5.6) seu comportamento se mostrou relativamente satisfatório. Apesar disso, foram observadas partículas assemelhadas à limalha aderidas ao tubo dosador do equipamento (Figura 5.7). Isto também ocorreu com a versão atomizada deste material e a hipótese foi a magnetização do material (a causa não foi investigada profundamente).

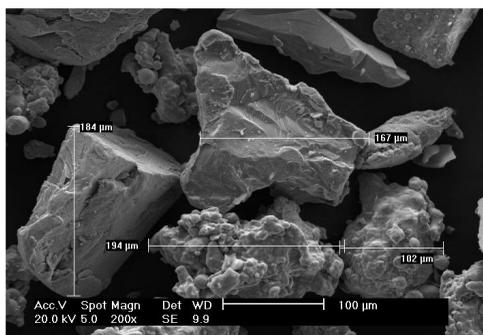


Figura 5.6. Morfologia da liga LO3* (mistura de pós triturados)



Figura 5.7. Partículas aderidas ao canal de queda do ADP

Já a tentativa de se alimentar o pó 316L de menor granulometria (11 μm - 45 μm) falhou devido ao não escoamento do pó através do canal de queda do ADP. O tamanho dos grãos causa propensão à compactação das partículas. Isso foi considerado um limitante do sistema (principalmente quando aplicado em pesquisa e desenvolvimento).

Outro limitante desse equipamento reside no fato de que, assim como no primeiro ADP estudado (fuso transportador), o silo armazenador de pó opera pressurizado, o que dificulta retorno de pó para o mesmo. Esse retorno de pó se mostra necessário quando se considera a implementação da pulsação do material de adição, uma das inovações a serem estudadas no presente trabalho. Os princípios e resultados da pulsação do pó serão apresentados no item 5.2. A literatura não informa a finalidade da pressurização do silo. Sendo assim, se realizou um ensaio cuja finalidade foi investigar a diferença na alimentação para silo aberto e fechado.

De fato, conforme mostra a Figura 5.8, o silo aberto resultou em menor capacidade do gás de arraste em transportar o pó (menor distância alcançada pelas partículas) para a mesma vazão de gás regulada. Ao se analisar o princípio construtivo deste sistema (Figura 2.27), é possível esclarecer a questão: ao se abrir o silo, a vazão se divide entre o tubo que leva gás até do silo e o orifício inferior de transporte de pó. Desta maneira, caso se deseje recuperar a vazão de gás adequada através do orifício inferior (que é a que, de fato, carrega o pó), ter-se-ia que elevar demasiadamente a vazão total, ocasionando grande desperdício de gás. Por outro lado, caso simplesmente se obstrua o tubo que leva gás ao silo, a diferença de pressão interna (na câmara da válvula rotativa) e a pressão atmosférica vencerá o peso da coluna de pó no canal de queda e

haverá fluxo de gás através deste, em direção ao silo (como verificado em teste). Isto perturbaria de maneira intensa a queda do pó e sua alimentação.



Figura 5.8. Distância (em mm) alcançada pelo jato de partículas com silo do alimentador modelo PM-PF-10 fechado (à esquerda.) e aberto (à direita), sob a mesma regulagem de vazão de gás (5 l/min, Ar)

Em assim sendo, se imaginou uma configuração na qual se obtivesse um isolamento físico entre o reservatório de pó (permitindo que este opere sem pressurização) e o recipiente que recebe o pó após sua dosagem. Esta foi mantida por válvula rotativa. Um desenho esquemático do chamado ADP-2 se encontra na Figura 5.9.

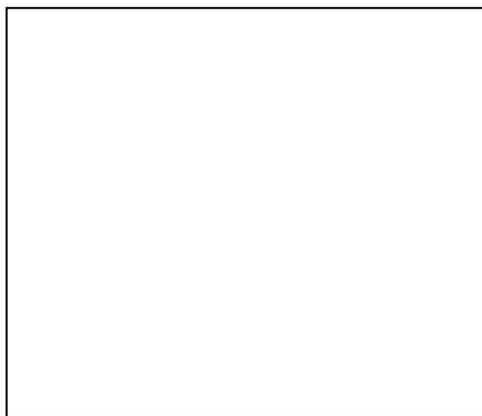


Figura 5.9. Esquema do ADP-2 com silo aberto

Neste ponto surgiu uma dúvida quanto à possibilidade de contaminação do gás de arraste por ar atmosférico que por ventura viesse a transpor a vedação da válvula rotativa. Deste modo, foram realizados ensaios de soldagem com o silo aberto e fechado pressurizado com Ar

(montagem vista na Figura 5.10), aos quais se seguiu análise da composição química do depósito soldado para verificação de possível oxidação.

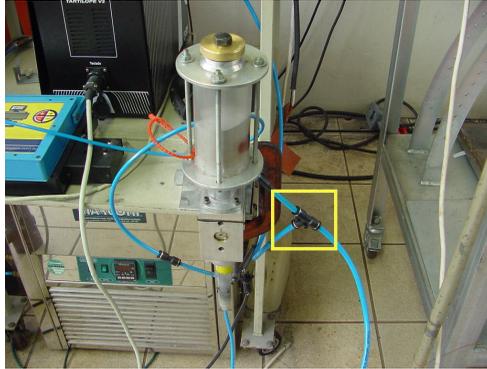


Figura 5.10. Montagem do sistema para pressurização do silo armazenador do ADP-2 (detalhe do “T”, que divide o gás entre a pressurização do silo e o arraste do pó)

Não houve diferença significativa nos teores de oxigênio do metal de solda, como mostra a Figura 5.11 (uma quantificação de oxidação pela medição da quantidade de oxigênio também foi realizada em [16]). Além disso, o cordão com silo fechado apresentou irregularidade geométrica. Isto pode ter sido causado por flutuações na pressão interna do fluidizador. (Ensaio preliminares com menor quantidade de pó no silo resultaram pulsação intensa no fluxo de gás / pó na tocha, possivelmente causada por desbalanceamentos intermitentes entre a pressão do silo e a pressão do fluidizador.)

Silo aberto		Teor médio de O 1,62 %
Silo fechado		Teor médio de O 1,55 %

Figura 5.11. Verificação da geometria do cordão (vista superior) e do teor médio de oxigênio na seção transversal

Apesar desta verificação, se considerou apropriado, por motivos de segurança, principalmente em campo, manter apenas uma pequena abertura na tampa do silo (Figura 5.12), que também permite o funcionamento do retorno de pó.



Figura 5.12. Silo armazenador com pequena abertura na tampa e tela protetora

Já a impossibilidade de alimentação de pós de menor granulometria (e/ou magnetizado) foi sobrepujada pelo novo design do acoplamento entre silo e tambor da válvula rotativa. Projetou-se um tambor de maior largura, permitindo também um maior diâmetro da ligação (canal de queda) entre as duas partes do ADP-2, o que eliminou a compactação do material e o entupimento ora citado. A Figura 5.13 mostra o projeto do ADP-2 em CAD, suas principais partes constituintes e o sistema montado.

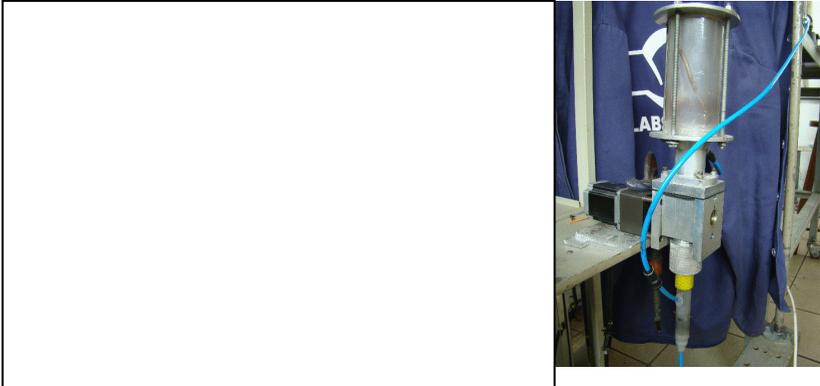


Figura 5.13. Modelo em CAD do ADP-2, cilindro dosador e ADP-2 montado

O novo tambor, devido às suas cavidades alongadas longitudinalmente ao sentido de rotação (detalhe Figura 5.13), permite que o comprimento destas se sobreponha, mantendo a continuidade da alimentação. Além disso, essa mesma característica construtiva permite que se fabriquem ranhuras paralelas, possibilitando a regulagem de diferentes faixas de alimentação de pó, para mesmas rotações. O tambor com ranhuras transversais à rotação, como o comercial PM-PF-10, não permite tal flexibilidade. A existência de superfícies em atrito do ADP-2 exige uma seleção de materiais resistentes à abrasão, o que está sendo feito, e acarretaria também em um tempo menor de vida útil de determinadas partes. Este aspecto, no entanto, será mais investigado a posteriori, para condições industriais de utilização.

Testes de desempenho mostraram baixa sensibilidade da alimentação à quantidade de pó no silo, o que foi um problema para o dosador tipo fuso. A dosagem volumétrica é realizada pela rotação do tambor, que tem suas cavidades preenchidas quando passam pela parte inferior do silo armazenador e esvaziadas na região diametralmente oposta, entregando o pó à linha de arraste. A Tabela 5.3 mostra os resultados dos testes.

Tabela 5.3. Desempenho do ADP-2 (IHM – interface homem / máquina)

Massa inicial de pó no silo: 202,0 g						
Regulagem na IHM (rpm)	Medição1 (g/min)	Medição2 (g/min)	Medição3 (g/min)	média (g/min)	desvio padrão (g/min)	desvio padrão em % da média
15 (11,25)	13,60	13,50	13,60	13,57	0,06	0,42
25 (18,75)	21,90	21,70	21,80	21,80	0,10	0,46
Massa inicial de pó no silo: 610,0 g (aproximadamente meio volume total)						
Regulagem na IHM (rpm)	Medição1 (g/min)	Medição2 (g/min)	Medição3 (g/min)	média (g/min)	desvio padrão (g/min)	desvio padrão em % da média
15 (11,25)	13,40	13,15	13,25	13,27	0,12	0,95
25 (18,75)	21,45	21,55	21,30	21,43	0,12	0,59

Nota-se que dentro dessa faixa, apesar de uma tendência a alimentação mais alta para menores quantidades de pó no silo, a diferença não passa de 2,6 % (para 11,25 rpm) entre as vazões mássicas de pó. Outro fator positivo se vê no baixo desvio padrão das medições, indicando repetitividade.

A Tabela 5.4 e a Figura 5.14 demonstram um funcionamento linear do sistema. O material utilizado neste ensaio foi o pó de aço inox 316 L esférico (53 μm – 180 μm), diferente do anterior (da Tabela 5.3), de 50 μm – 90 μm (origem da diferença nos valores de vazão mássica).

Tabela 5.4. Determinação da curva de alimentação do ADP-2

Regulagem na IHM (rpm)	5 (3,75)	10 (7,5)	15 (11,25)	20 (15,0)	25 (18,75)
vazão1 (g/min)	7,2	13,9	20,7	26,1	32,5
vazão2 (g/min)	7,0	13,7	20,4	26,4	32,5
vazão3 (g/min)	7,0	14,1	20,6	25,8	32,4
média (g/min)	7,07	13,90	20,57	26,10	32,47
desvio padrão (g/min)	0,12	0,20	0,15	0,30	0,06
desvio padrão em % da média	1,63	1,44	0,74	1,15	0,18

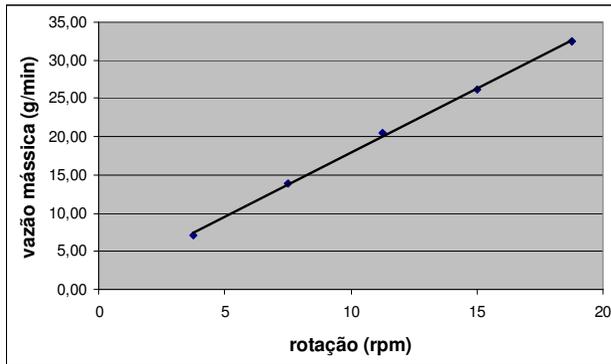


Figura 5.14. Vazão mássica de pó, ADP-2, liga 316L em pó esférico (com linha de tendência)

5.1.1. Transporte do material com regularidade em soldagem fora de posição: Fluidização vs. Estrangulamento (Efeito Venturi)

Um dos desafios mais contundentes a ser vencidos no âmbito do trabalho foi o carregamento de maneira regular do pó quando da soldagem fora de posição. A maioria das aplicações descritas na literatura trata de soldas na posição plana, com o alimentador de pó posicionado acima da zona de trabalho. Nesta configuração, somente a capacidade do sistema em dosar adequadamente o pó e um simples “impulso” já são suficientes, pois o transporte do mesmo até a tocha é auxiliado pela ação da gravidade.

Com base nas informações da literatura, duas soluções foram imaginadas, as quais colocariam o pó em suspensão após sua dosagem e o infligiriam a energia cinética necessária para alcançar a tocha de maneira adequada em posições de soldagem fora da plana: utilização do efeito Venturi [60] ou de uma câmara para fluidização do pó até o estado de transporte pneumático [74]. Ambos podem ser observados esquematicamente na Figura 5.15, que mostra também as montagens físicas.

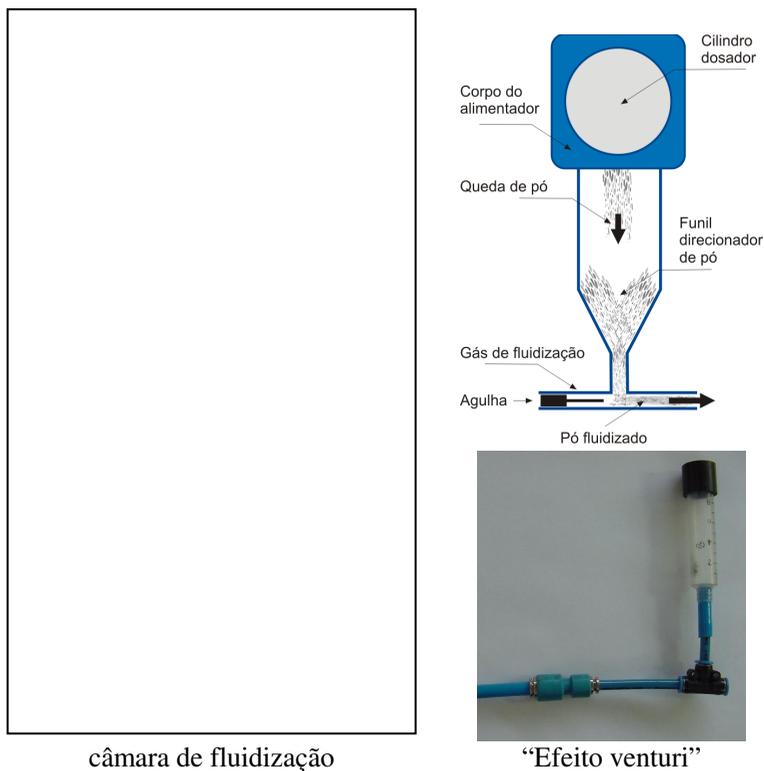


Figura 5.15. Princípios para suspensão e transporte do material em pó para alimentação à tocha de soldagem PTA-P

Testes comparativos mostraram que, apesar da capacidade de ambos os sistemas em transportar o pó até a extremidade da mangueira com vazões adequadas de gás de arraste, houve pulsação na alimentação com o Venturi. Neste ensaio, a extremidade da mangueira de alimentação foi posicionada acima do ADP-2, simulando uma solda na posição vertical, como mostra a Figura 5.16. O comprimento da mangueira foi

mantido em 2,0 m para ambas as situações. O pó utilizado foi o 316 L, submetido a uma vazão de 3,5 l/min de Ar, numa rotação do ADP-2 de 22,5 rpm.

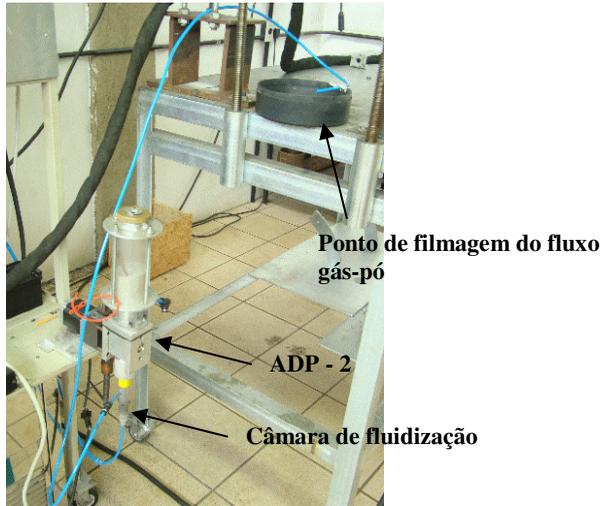


Figura 5.16. Montagem para ensaios comparativos (filmagem) entre a câmara de fluidização (na foto) e o tubo de estrangulamento (efeito Venturi, não ilustrado nesta figura)

Decidiu-se, a partir destes resultados, pela adoção da câmara de fluidização. Esta decisão acarretou na necessidade de se averiguar o tempo de entrada em regime da taxa de alimentação, pois o próprio princípio da Fluidização prevê a formação inicial e manutenção de um leito fixo na câmara, o qual leva certo tempo para se estabilizar. Este tempo seria considerado nos ensaios subsequentes.

Foram ensaiados três tipos de pós (Stellite 6 ® para PTA-P, 316L e FeCrMn para PTA-P (marca Cogne)). Segundo os resultados traduzidos pela Figura 5.17, obtidos numa rotação do ADP-2 de 5,25 rpm e vazão de gás de fluidização de 3,5 l/min, o tempo de entrada em regime pode ser bem estimado em 90 s. Recomenda-se, no entanto, que esta verificação seja realizada para cada pó e vazão a serem utilizados na prática.

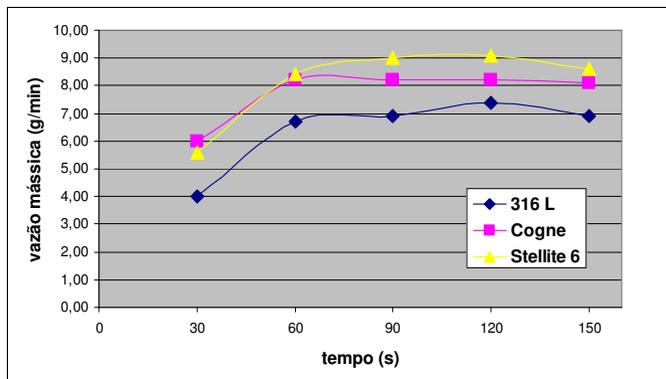


Figura 5.17. Tempo de entrada em regime para diferentes pós metálicos atomizados (esféricos) para PTA-P

Para visualização rápida, o gráfico em rede da Figura 5.18 fornece um panorama da análise comparativa qualitativa entre os modelos de alimentador de pó considerados, a partir do qual se selecionou para continuação do trabalho o ADP-2.

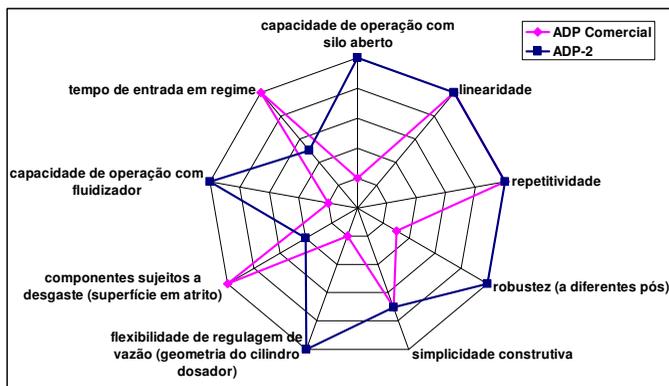


Figura 5.18. Gráfico em rede comparativo entre os ADPs investigados

5.2. Pulsação 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 [90]) e metalúrgicas (como refino de grão [50]). No processo MIG/MAG, caracterizado intrinsecamente pelo atrelamento entre fornecimento de energia e de material de aporte, a velocidade do arame-eletrodo é pulsada em sincronia com a corrente de soldagem, quando há pulsação da corrente média em baixa frequência (pulsação térmica). Em processos com eletrodo permanente, leia-se TIG e Plasma, o arame também é pulsado junto à corrente, porém existe a possibilidade de se interromper totalmente o fornecimento de arame, de acordo com a técnica empregada no procedimento ou necessidade em cada tarefa.

Apesar de se encontrarem na literatura trabalhos que abordam o PTA-P com pulsação de energia, nos quais benefícios de fato são verificados, não há menção à respectiva pulsação sincronizada de aporte de material (pó metálico). Levanta-se uma questão, portanto, quanto à possibilidade de melhoria de qualidade da solda e/ou redução de desperdício de material pela adequação da quantidade de material aportado à energia de soldagem num determinado momento.

Neste contexto, se decidiu por projetar, construir e testar um sistema de pulsação de pó. Como premissa inicial de projeto, foi determinado que a pulsação da alimentação de pó não deveria ser imaginada pela simples interrupção e abertura do fluxo do fluido gás / pó, o que traria intensa perturbação ao plasma (pelas pulsações bruscas de pressão), mas sim, pelo desvio do fluido gás / pó do trajeto até a tocha, método que impõe alterações mais suaves ao plasma. O gás / pó desviado retorna ao silo armazenador do ADP-2.

A tentativa inicial, com uma válvula direcional comercial com conexões adaptadas, resultou em trancamento dos canais por incrustação de pó (Figura 5.19).



Figura 5.19. Válvula direcional comercial com conexões adaptadas, travada por incrustação de pó

Em seguida, foi projetado um pulsador de pó, composto de uma parte mecânica (válvula) e respectivo hardware (driver), controlados pelo software integrado do processo. A Figura 5.20 ilustra o princípio de funcionamento mecânico da válvula, que tem um canal de entrada único e dois canais de saída, e mostra o sistema montado, inclusive o driver. Ela é dotada de um motor de passo que, comandado (por passos e direção) pelo software integrado, comuta digitalmente (aberto/fechado) a saída para a tocha. O gás / pó desviado de maneira suave retorna, então, de ao silo armazenador do ADP-2.

Já se iniciaram trabalhos no sentido de regular a porcentagem da área total de saída que conduz pó efetivamente à tocha, dosando a quantidade de pó desviada.



Figura 5.20. Pulsador de pó (uma entrada, vinda do ADP-2 e duas saídas: uma à tocha e outra de retorno ao silo do ADP-2) modelado e conjunto físico montado, com motor, redutor e respectivo driver

A primeira versão do componente tinha o eixo dosador fabricado em Teflon[®], para amenizar o atrito. No entanto, devido à deformação elástica que esse material sofre (causando histerese), o controle de abertura não se mostrou repetitivo. Assim, se construiu um segundo protótipo em aço inoxidável.

O software e hardware também permitem a regulagem da sincronização (ou defasagem) entre tempos abertura / fechamento com os tempos da pulsação da corrente de soldagem (o que se faz necessário devido à maior dinâmica de alteração da corrente do que de alteração no fluxo do pó na tocha). (A tela do software com estes comandos pode ser vista na Figura 4.5)

Para análise do comportamento do sistema, primeiramente foi observado o atraso entre o tempo de início de comutação da válvula em direção à tocha e o momento efetivo de chegada do pó na mesma, por intermédio de cronometragem. Para um comprimento de mangueira de 2,0 m entre o ADP-2 e a entrada da válvula, 2,0 m entre a saída 1 e entrada no silo do ADP-2 e 2,0 m entre a saída 2 e a tocha e uma vazão de gás de arraste de 3,5 l/min de Ar e uma taxa de alimentação média de pó (316L esférico) de 7,3 g/min, o atraso médio foi 1,7 s.

A medição do tempo se deu de maneira manual. Para estudos mais aprofundados sobre a pulsação do pó, pretende-se implementar um sistema automático para esta medição, independente do operador. Devido a mudanças nas condições de fluxo para diferentes condições (vazão de gás, tipo de pó, comprimento de mangueira...) se recomenda que a determinação do atraso seja realizada antes de quaisquer ensaios a este respeito.

Em seguida, foi realizado ensaio em soldagem pulsada, sob pulsação do pó. Para isso, os momentos de abertura da válvula foram sincronizados com a pulsação de corrente, de modo que o pó chegasse à tocha durante o pulso, e ficasse ausente na fase de base. Os parâmetros de soldagem se encontram na Tabela 5.5. A taxa de alimentação (V_{mpo}) determinada foi a média medida na tocha (englobando tempo de pulso, com pó e base, sem pó). Lembra-se que o comprimento do cordão é igual à largura da chapa, 100,0 mm.

Tabela 5.5. Parâmetros de soldagem PTA-P pulsada com pulsação sincronizada de alimentação de material em pó (parâmetros elétricos medidos via SAP)

I_p^* (A)	I_b^* (A)	t_p (s)	t_b (s)	I_m^* (A)
150	73	0,9	0,9	111
U_p^* (V)	U_b^* (V)	U_m^* (V)	P_m^* (kW)	V_{ga} (l/min)
26,3	21,7	24,3	2,8	3,5
V_{gpl} (l/min)	V_{gprot} (l/min)	V_s (cm/min)	V_{mpo} (g/min) (médio)	Massa do cordão* (g)
2,0	12,0	10,0	7,3	7,3
\varnothing_c (mm)	Re (mm)	\varnothing_e (mm)	DBP (mm)	
4,0	3,5	4,0	13,0	
* valores medidos				

A Figura 5.21 mostra os cordões de solda resultantes na seção transversal, vista superior e seção longitudinal.



Dimensões do cordão	
$P_{m\acute{a}x}$ (mm) (média)	0,66
L (mm)	7,76
R (mm)	1,41
Diluição (%) (média)	28,75

Figura 5.21. Cordão obtido em soldagem PTA-P pulsada com pulsação sincronizada de alimentação de material em pó

Com objetivo de comparação, foi realizada soldagem em modo pulsado, sob as mesmas regulagens, porém com alimentação contínua de pó. A rotação do ADP-2, portanto, teve que ser ajustada (reduzida) para obtenção de valor similar ao médio quando pulsado. Os parâmetros de soldagem se encontram na Tabela 5.6 e os cordões resultantes, na Figura 5.22

Nota-se manutenção da P_m (potência média) de soldagem, porém uma diferença na eficiência de deposição, com maior massa de cordão para a soldagem com pulsação do pó. É importante lembrar que a taxa de alimentação durante o pulso foi maior para esta condição do que para ausência de pulsação do pó, para se manter a média similar. No primeiro caso, com pulsação de pó, se mediram 7,3 g/min em média à tocha (cerca de 14,6 g/min durante o pulso, portanto). Foram percebidos vazamentos na válvula e diferenças dinâmicas nos fluxos de cada trajetória, os quais devem ser abordados com maior aprofundamento em trabalho posterior para melhoramentos do sistema de pulsação de pó.

Seria possível levantar duas hipóteses para a diferença entre eficiências de deposição: primeiramente, de que os 150 A do pulso seriam uma corrente demasiada para uma taxa de alimentação contínua de 7,4 g/min, o que levaria à vaporização de parte do material nesta fase. Apesar de alguns autores [12, 25] citarem a possibilidade de maiores correntes causarem maior vaporização, Xibao e Hua [31], em seus cálculos, determinaram que a perda de material de adição por evaporação se daria apenas a partir de 200 A (para partículas menores de 75 μm diamétrais). A literatura também cita que o aquecimento do pó depende pouco de suas propriedades termofísicas e da corrente de soldagem, pois a diferença de temperatura entre o plasma e as partículas é demasiadamente alta ($T_a \gg T_p$). Os fatores determinantes para o comportamento térmico do pó seriam, portanto, o tempo de permanência no arco, a trajetória e as condições de troca de calor na poça metálica [35]. Isto fomenta, portanto, a validade da segunda hipótese: no período de pulso, 150 A são suficientes para fundir e depositar 7,4 g/min alimentados continuamente, mas os 80 A da fase de base não, o que leva a menor eficiência global. Ou seja, para diferentes condições de soldagem, a corrente de base deve ser mantida em um patamar que seja suficiente para depositar a quantidade de material adicionada.

Tabela 5.6. Parâmetros de soldagem PTA-P pulsada com alimentação contínua de material em pó (parâmetros elétricos medidos via SAP)

Ip* (A)	Ib* (A)	tp (s)	tb (s)	Im* (A)
150	73	0,9	0,9	110
Up* (V)	Ub* (V)	Um* (V)	Pm* (kW)	Vga (l/min)
26,5	22,8	24,6	2,8	3,5
Vgpl (l/min)	Vgprot (l/min)	Vs (cm/min)	Vmpo (g/min)	Massa do cordão* (g)
2,0	12,0	10,0	7,4	6,1
Øc (mm)	Re (mm)	Øe (mm)	DBP (mm)	
4,0	3,5	4,0	13,0	

* valores medidos



Dimensões médias do cordão	
Pmáx (mm) (média)	0,29
L (mm)	7,86
R (mm)	1,29
Diluição (%) (média)	14,78

Figura 5.22. Cordão obtido em soldagem PTA-P pulsada com alimentação contínua de material em pó

Por outro lado, quando há pulsação do pó, os 150 A do pulso são suficientes para soldar os 14 g/min direcionados pela válvula à tocha, nesta fase.

As macrografias das figuras mostram que o aspecto geométrico do cordão sofreu alterações nos diferentes modos de soldagem. Primeiramente, se nota R e L similares. Quanto à maior penetração máxima $P_{máx}$ e diluição obtidas com pulsação de pó, se apresenta, a princípio, uma contradição com a literatura, pois se relata redução destes valores com aumento da taxa de deposição [9, 10, 16, 61]. No entanto, para o modo pulsado, durante o tempo de base não há presença de material de adição, e a corrente, mesmo que menor (corrente de base) age diretamente sobre o substrato. Além deste fato inerente, o tempo efetivo do pulso de pó na tocha, por razões relativas às propriedades do fluxo do fluido gás/pó, acaba sendo menor que o tempo de abertura da válvula, cuja frequência de comutação foi programada para ser a mesma que a de pulsação de corrente. Desta maneira o tempo de pulso de corrente é maior que o tempo de pulso de pó. Neste tempo a mais, a alta corrente de pulso também atua na ausência de material de adição e cava mais o substrato.

Também houve mudança na textura das escamas, que se mostraram mais espessas para o modo com pulsação da alimentação de pó. Da mesma maneira, o perfil longitudinal mostra maior ondulação da linha de fusão para este caso.

Os resultados forneceram um conceito de válvula de pulsação de material de adição para PTA-P e mostraram a tendência de comportamento da solda quando da sincronia entre pulsação de pó e pulsação de corrente. Para avaliação em relação a possíveis aplicações industriais, seria interessante evitar o desperdício de material e a alta diluição, pelo balanceamento entre corrente de base e taxa de alimentação de base (não removendo totalmente a alimentação na base), assim como verificar o potencial de aumento da taxa de deposição global, pelo balanceamento entre corrente e taxa de alimentação de pulso. Isto pode ser realizado pela rotação parcial do eixo dosador entre as duas saídas da válvula.

Apesar de se ter conseguido a operacionalização da válvula de pulsação de pó para os ensaios previstos, melhorias no projeto se mostraram necessárias. A premissa inicial de vedação do sistema levou à aplicação de elementos móveis em deslizamento com interferência, o que, por sua vez, gerou alto nível de atrito, forçando folgas e, em consequência vazamentos. A dinâmica e resposta do sistema em diferentes condições (comprimento de mangueiras, materiais, gases, etc.) devem

ser mais bem compreendidas, no âmbito de futuros trabalhos, por intermédio de ensaios mais aprofundados.

5.3. Medição da Vazão de Pó

Um fator otimizador de processos de soldagem, por vezes indispensável, é o controle realimentado dos subsistemas. Em fontes de soldagem de alto desempenho, por exemplo, as variáveis são continuamente reajustadas para obtenção das funcionalidades desejadas. Dispositivos de deslocamento de tocha, por sua vez, fazem uso deste artifício para garantir que a movimentação traduza o que efetivamente foi programado. Uma parte fundamental de métodos de controle é a monitoração da variável em questão. No âmbito puramente científico, a monitoração fornece subsídios para a compreensão dos fenômenos inerentes a cada processo. Outra aplicação importante da monitoração é a verificação e calibração de equipamentos industriais.

Em processos de soldagem, uma das variáveis monitoradas é a taxa de alimentação de material. No caso do PTA-P não foram encontrados no mercado equipamentos que possuísem um sistema de monitoração da vazão de pó efetivamente conduzido à tocha. Tampouco a busca no mercado específico de medição de vazão de particulados obteve êxito, pois as aplicações usuais possuem condições distintas do PTA-P, em termos de propriedades de material transportado, vazão, dimensões de tubulação, etc. A solução: desenvolver um sistema.

A primeira tentativa realizada no LABSOLDA foi um sensor capacitivo, devido ao conhecimento do uso deste princípio em medições na área de fluxo de líquidos. Buscou-se, então, na literatura um design apropriado para essa aplicação. A descrição detalhada da concepção do instrumento se encontra em [98]. A Figura 5.23 mostra a construção do sensor, cuja eficácia, em teoria, é maior quanto maior for seu comprimento. Testes práticos em condições típicas de soldagem PTA-P (fluxo de gás e pó) levaram a resultados não satisfatórios, sem alterações significativas de capacitância. O pó utilizado foi o 316 L para PTA-P.

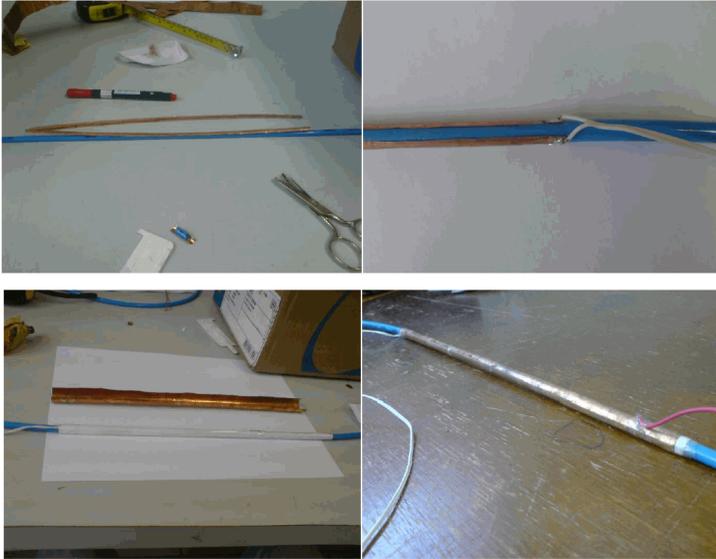


Figura 5.23. Sensor capacitivo testado para medição da vazão de pó metálico

Uma busca na literatura científica levou a um trabalho [99], que descreve um método ativo de medição de fluxo de pó, o qual poderia ser adaptado. Neste, portanto, se baseou a construção de um dispositivo para tentativa de medição da vazão mássica de pó metálico para PTA-P. A Figura 5.24 mostra um desenho esquemático e a Figura 5.25, o aparato inicialmente construído, que conta com dois tubos de cobre isolados entre si (isolamento representado na Figura 5.24 por R), um “eletrômetro” (aparelho capaz de medir correntes da ordem de pA), uma fonte de tensão e um osciloscópio. O método é designado por “ativo” pela presença de uma fonte de tensão contínua, que, segundo o citado trabalho, carrega eletricamente as partículas quando estas passam pelo primeiro tubo. Ao se descarregar no contato com a parede do segundo tubo, as partículas geram uma corrente proporcional à quantidade de pó fluindo.

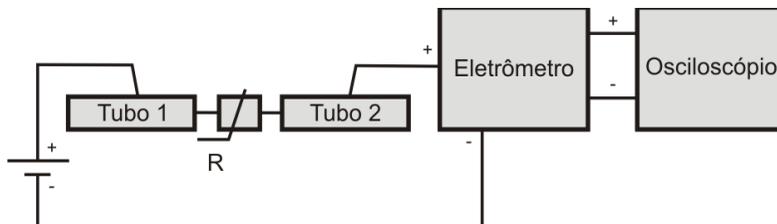


Figura 5.24. Diagrama esquemático da medição ativa de vazão de pó

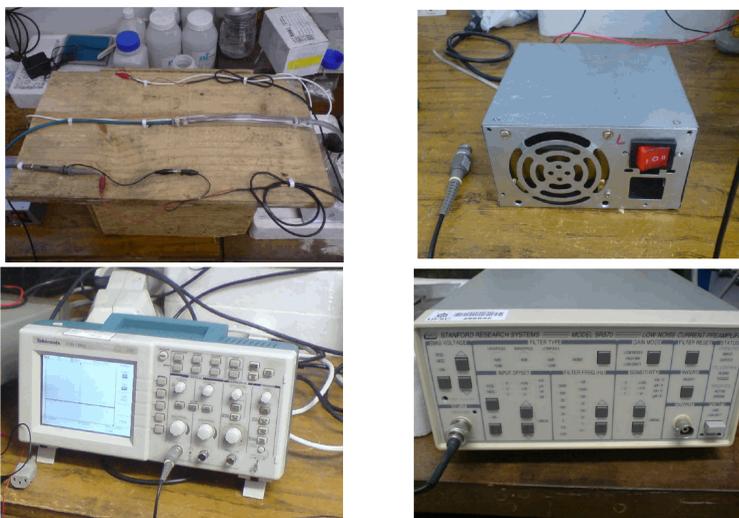
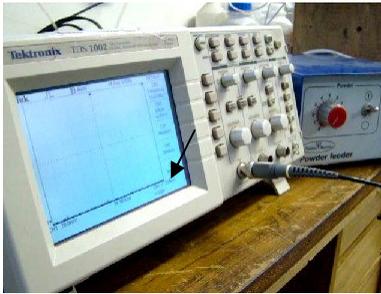


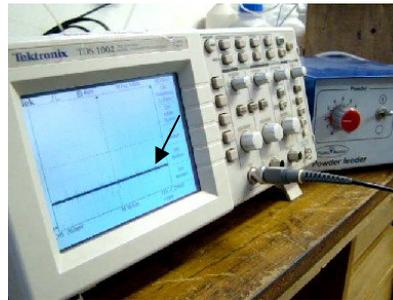
Figura 5.25. Aparato inicialmente construído para medição ativa de vazão de pó, que conta com dois tubos de cobre isolados entre si, um “eletrômetro” (aparelho capaz de medir correntes da ordem de pA), uma fonte de tensão e um osciloscópio

Apesar de se ter obtido uma resposta proporcional às variações na alimentação de material, como mostra a seqüência da Figura 5.26, o dispositivo se mostrou muito sensível a interferências externas, como ruídos provenientes da rede elétrica ou a presença da mão do operador, por exemplo. Numa iniciativa para tentar filtrar as perturbações, a faixa de corrente lida pelo eletrômetro foi aumentada, levando a uma redução na sensibilidade da medição. Além disso, ao se retirar a fonte de tensão

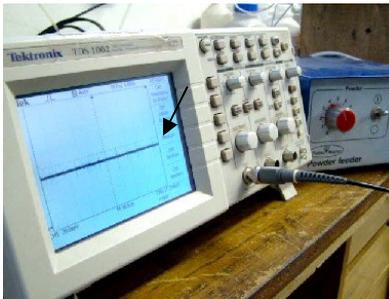
da montagem, a resposta foi a mesma. Isto levou à consideração do método passivo de medição [100].



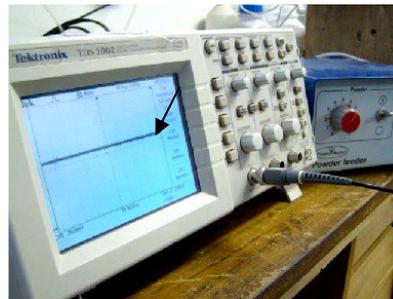
regulagem = 0



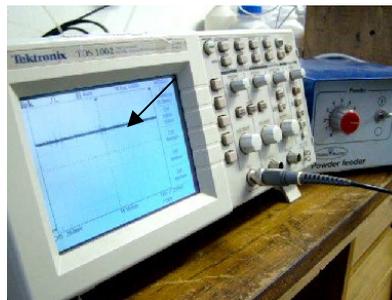
regulagem = 2



regulagem = 5



regulagem = 7



regulagem = 8

Figura 5.26. Comportamento do medidor de vazão de pó para PTA-P pelo método ativo (regulagem do ADP PM-PF-10, vide posição do botão vermelho, e leitura no osciloscópio)

O método passivo de medição sugere uma configuração física similar, porém utilizando tubos poliméricos ao invés de metálicos, aproveitando o efeito tribo-elétrico (troca de cargas elétricas entre dois materiais pelo atrito entre eles). Este efeito é mais pronunciado para interação metal / polímero do que metal / metal, o que elevaria a corrente gerada, melhorando a sensibilidade da medição, além da vantagem de que, por não serem metálicos, os tubos não funcionam como “antenas” para ruídos externos. Foi montada uma segunda bancada de testes (Figura 5.27), substituindo os tubos de Cu por tubos de Nylon grafitado e Teflon carregado com C (os polímeros precisam ter um mínimo de condutividade elétrica. As composições químicas exatas não puderam ser obtidas dos fornecedores das peças).

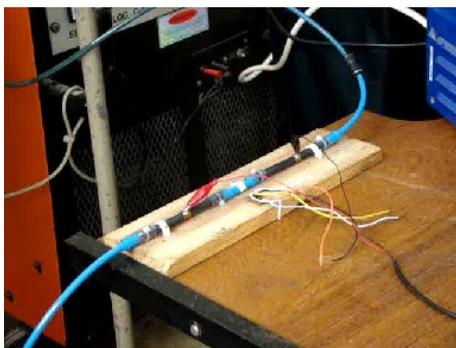


Figura 5.27. Aparato para o método passivo de medição de pó para PTA-P

A Figura 5.28 ilustra uma seqüência de medições.

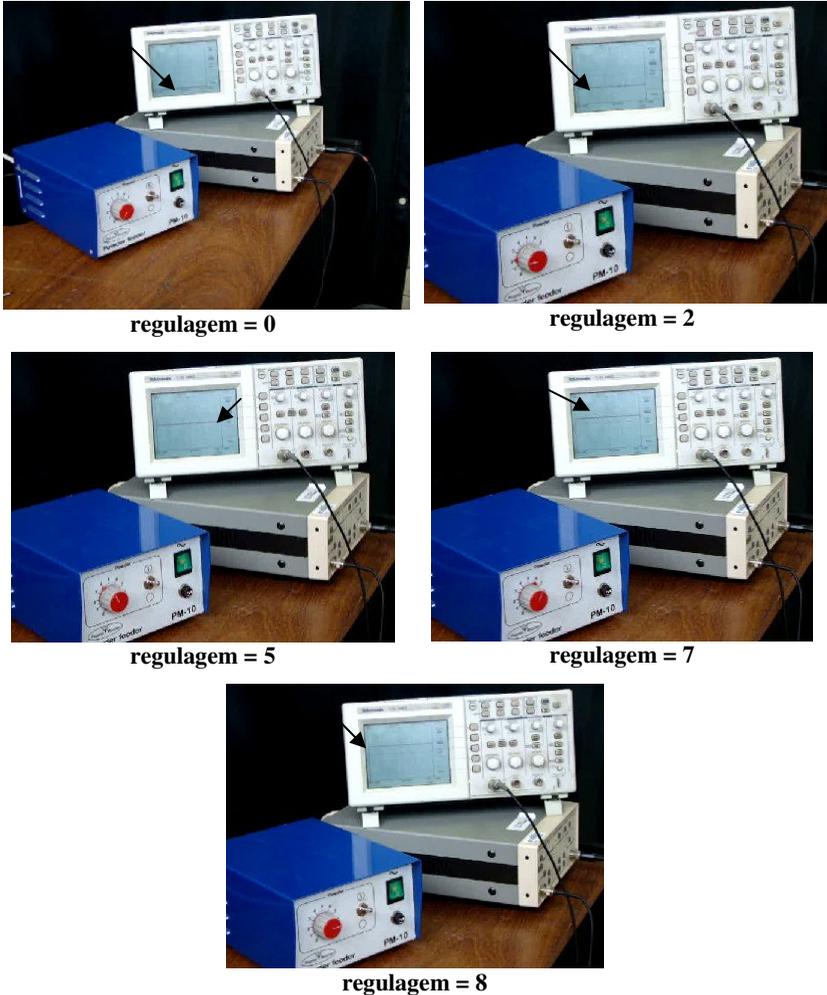


Figura 5.28. Comportamento do medidor de vazão de pó para PTA-P pelo método passivo (regulagem do ADP PM-PF-10, vide posição do botão vermelho, e leitura no osciloscópio)

As correntes induzidas nos tubos de cobre são significativamente menores (da ordem de pA) que as induzidas nos tubos poliméricos (da ordem de nA). As maiores amplitudes de corrente obtidas com os polímeros facilitam substancialmente o tratamento de sinal, amplificação e

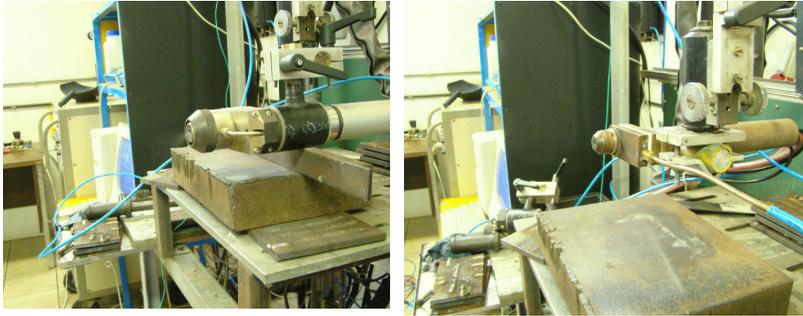
filtragem, permitindo leituras mais confiáveis e garantindo uma maior robustez do sistema.

Entretanto, observou-se nos experimentos realizados com tubos poliméricos com carga que há uma tendência à saturação prematura da corrente induzida pela passagem de pó metálico. Em outras palavras, a leitura de corrente perde sensibilidade com o aumento da vazão de pó e a corrente chega a seus patamares máximos ainda antes de o alimentador de pó (ADP) chegar ao máximo de sua escala. Acredita-se que este problema possa ser contornado pela alteração de aspectos construtivos do aparato, como comprimento, diâmetro e até mesmo composição química dos tubos poliméricos carregados.

5.4. Tocha

5.4.1. Características de injeção de pó

Tendo em vista as aplicações do processo relatadas, o desempenho das tochas PTA-P quando utilizadas em soldas fora de posição deve ser um critério de tomada de decisão quanto às suas características construtivas. Deste modo, se realizaram testes para verificar o desbalanceamento da distribuição da alimentação de pó entre os orifícios injetores superiores e os inferiores, na posição vertical de soldagem (a que causaria maior desbalanceamento), uma vez que a diferença na injeção das partículas no arco poderia causar alterações em suas características térmicas e dinâmicas e nas da poça. Para isso, se dividiu a coleta de pó realizada em 60 segundos (taxa de alimentação em regime) para os orifícios superiores e inferiores, para uma tocha com injeção interna e outra com injeção externa de pó, conforme Figura 5.29.



Tocha com injeção interna de pó Tocha com injeção externa de pó

Figura 5.29. Verificação da distribuição de alimentação de pó na posição vertical de soldagem para diferentes tochas PTA-P

O ensaio varreu diferentes valores de vazão de gás de arraste e de pó, conforme o gráfico da Figura 5.30, que contém também os resultados para cada caso. Sabe-se que as condições sob arco de soldagem aberto são distintas, mas acredita-se esta ser uma boa indicação do comportamento em soldagem. Além disso, a realização desta verificação em soldagem seria tecnicamente inviável. O gráfico ilustra a porcentagem do material dosado pelo alimentador de pó injetada através dos orifícios superiores e inferiores de cada tocha (neste caso foi utilizado o ADP do modelo comercial PM-PF-10, com sistema “venturi” acoplado, uma taxa de alimentação² de 9,2 g/30s e comprimento de mangueira do alimentador à tocha de 1,3 m). Pode-se observar, na mesma figura, a representação ilustrativa de ambos os modelos, se pode atentar para o fato de que, para a injeção externa, os jatos de pó são cilíndricos, através de orifícios concêntricos ao eletrodo; para injeção interna, o jato é anular, coaxial ao eletrodo, resultando em maior área transversal, e, portanto, redução na velocidade do fluido gás de arraste - pó.

² Unidade g/30s foi adotada em alguns casos para agilizar os ensaios.

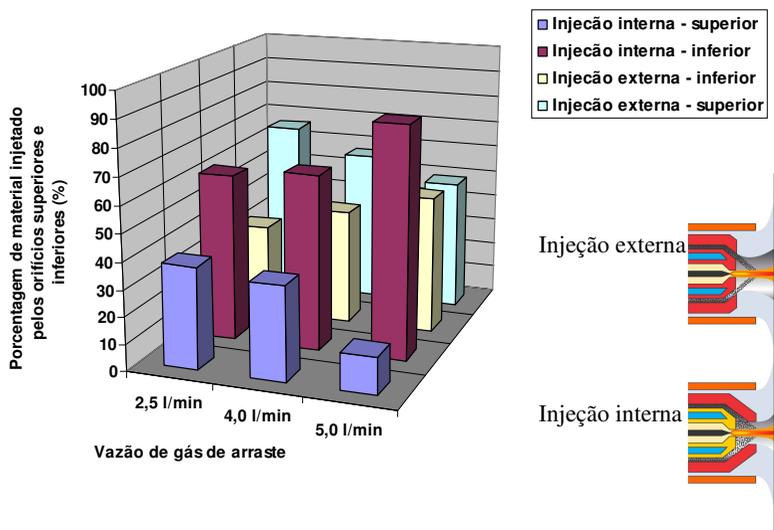


Figura 5.30. Distribuição da alimentação de pó à tocha para posição de soldagem vertical. (As vazões de gás de arraste se referem ao gás de arraste do “venturi” e a vazão de gás ao alimentador ficou fixa em 2,0 l/min). À dir., representação dos tipos de tocha

Nota-se que há uma tendência à equalização (simetria entre a injeção através dos orifícios superiores e inferiores) somente em uma vazão de gás de arraste pelo “venturi” de 5,0 l/min, para injeção externa. Este valor, somado à vazão ao alimentador, resulta em 7,0 l/min à tocha, valor alto em relação aos citados na literatura.

Apesar de não fazer parte do objetivo previamente traçado do ensaio, uma informação determinante surgiu na análise dos resultados. A Tabela 5.7 mostra quantitativamente as taxas de pó injetadas pelos orifícios superiores e inferiores e a soma delas. Percebe-se que, para a tocha com injeção interna, mesmo para vazões mais altas de gás de arraste, existe acúmulo de pó em seu interior (que se intensifica para menores vazões).

Tabela 5.7. Taxas de alimentação (valores médios) de pó separadas entre os orifícios injetores superiores e inferiores da tocha, para uma taxa de alimentação previamente regulada em 9,20 g/30s

Tocha com injeção externa				Tocha com injeção interna			
Vga	Ai	As	Tpi	Vga	Ai	As	Tpi
2,5	3,07	5,98	9,05	2,5	3,18	1,93	5,12
4,0	4,12	5,47	9,58	4,0	4,57	2,43	7,00
5,0	4,62	4,36	8,98	5,0	6,72	1,07	7,79
		média	9,24				
		desvio padrão	0,28 g				
Vga	Vazão de gás de arraste (l/min)						
Ai	Injeção inferior de pó (g/30s)						
As	Injeção superior de pó (g/30s)						
Tpi	Total de pó injetado em 1 minuto (g/30s)						

Já para a tocha com alimentação externa não se observou este fenômeno. Foi realizado, então, um teste com uma vazão total de gás de arraste (gás através do “venturi” + gás ao alimentador de pó (2,0 l/min+1,5 l/min)) igual a 3,5 l/min, dentro da faixa usual para o processo e taxa de alimentação previamente regulada em 4,35 g/30s. A Figura 5.31 indica uma predominância de injeção pelos orifícios inferiores. Apesar disso, se observou que ainda há transporte completo do pó, sem acúmulo na tocha.

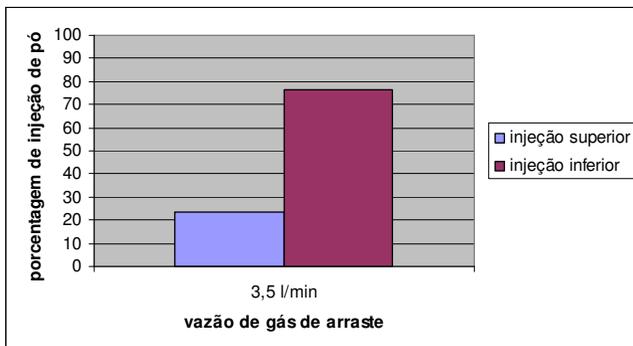


Figura 5.31. Distribuição da injeção de pó entre os orifícios inferiores e superiores da tocha com alimentação interna de pó (taxa de alimentação de 4,35 g/30s)

Os resultados já apresentaram, neste ponto, a tendência à adoção do modelo de injeção externa de pó para tochas PTA-P na seqüência dos trabalhos. Neste modelo, o princípio construtivo dos canais de pó da tocha não provoca o acúmulo de pó dentro da tocha, como no caso da tocha com injeção interna.

Para análise na posição sobrecabeça, se verificou a capacidade da tocha com injeção externa de pó em manter (ou alterar apenas levemente) o ponto focal de injeção de pó. A Figura 5.32 mostra o ponto focal geométrico e o efetivo verificado. Nota-se que se manteve coincidência. Novamente, se faz a ressalva de que as condições de carregamento das partículas são diferentes no interior do plasma, como visto no item 2.5, mas o resultado do ensaio indica uma tendência do processo a manter inalteradas as propriedades da trajetória das partículas, com a mudança de posição da tocha.

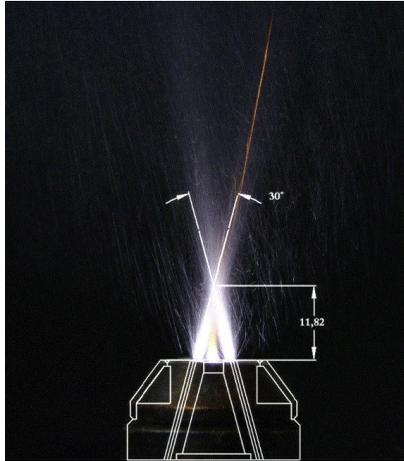


Figura 5.32. Coincidência entre o ponto focal de injeção de pó geométrico e efetivo, para a tocha com injeção externa de pó

5.4.2. Resultados em soldagem

5.4.2.1. Taxa de deposição

Um dos aspectos a se levar em conta na seleção de uma tocha de soldagem para aplicações industriais é a taxa de deposição (para determinada taxa de alimentação) que ela é capaz de fornecer, para dadas condições de soldagem.

Com a finalidade de investigar a influência do tipo de tocha PTA-P sobre a taxa de deposição, se realizaram ensaios sob diferentes correntes de soldagem, e os valores monitorados estão representados nas Tabelas 5.8 e 5.9. As soldas foram realizadas com a tocha comercial PP-6-01 (injeção interna) e a tocha PTS3, construída no próprio LABSOLDA (injeção externa). O pó utilizado foi o 316 L.

Tabela 5.8. Parâmetros de soldagem PTA-P para verificação da influência do tipo de tocha sobre a taxa de deposição – Tocha com injeção externa de material em pó (parâmetros elétricos medidos via SAP)

Im_1^* (A)	Um_1^* (V)	Pm_1^* (kW)		
148,3	27,8	4,1		
Im_2^* (A)	Um_2^* (V)	Pm_2^* (kW)		
110,3	24,4	2,7		
Im_3^* (A)	Um_3^* (V)	Pm_3^* (kW)		
70,9	23,2	1,6		
Im_4^* (A)	Um_4^* (V)	Pm_4^* (kW)		
51,8	22,8	1,2		
Vgpl (l/min)	Vgprot (l/min)	Vga (l/min)	Vs (cm/min)	Vmpo (g/30s)
2,0	12,0	3,5	10,0	4,85
Øc (mm)	Re (mm)	Øe (mm)	DBP (mm)	Posição
4,0	3,5	4,0	13,0	plana
* valores medidos				

Tabela 5.9. Parâmetros de soldagem PTA-P para verificação da influência do tipo de tocha sobre a taxa de deposição – Tocha com injeção interna de material em pó (parâmetros elétricos medidos via SAP)

Im_1^* (A)	Um_1^* (V)	Pm_1^* (kW)		
146,9	30,5	4,5		
Im_2^* (A)	Um_2^* (V)	Pm_2^* (kW)		
108,8	28,2	3,1		
Im_3^* (A)	Um_3^* (V)	Pm_3^* (kW)		
69,9	24,7	1,7		
Im_4^* (A)	Um_4^* (V)	Pm_4^* (kW)		
51,1	23,8	1,2		
Vgpl (l/min)	Vgprot (l/min)	Vga (l/min)	Vs (cm/min)	Vmpo (g/30s)
2,0	12,0	3,5	10,0	4,70
Øc (mm)	Re (mm)	Øe (mm)	DBP (mm)	Posição
4,0	3,5	4,0	13,0	plana
* valores medidos				

A Figura 5.33 mostra o comportamento da massa dos cordões depositados, lembrando que os mesmos têm 100,0 mm de comprimento, perfazendo 1 minuto de tempo de soldagem.

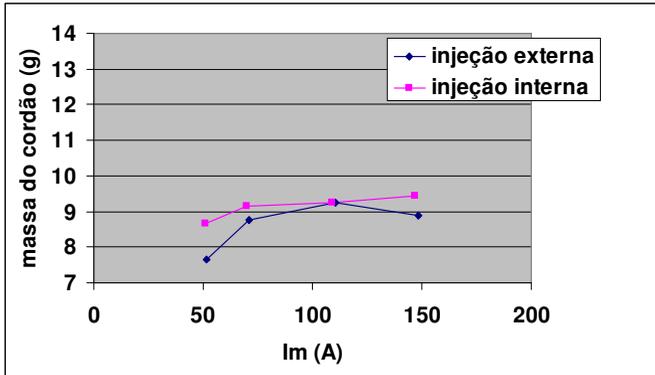


Figura 5.33. Massa dos cordões depositados em 1 minuto de soldagem

Nota-se, para a tocha com injeção externa, um aumento e subsequente leve queda na taxa de deposição (talvez dentro do erro), enquanto a tocha com injeção interna segue uma rampa ascendente, sob as dadas condições de soldagem.

Pode-se imaginar que o comportamento da solda, no caso de injeção externa, para correntes da ordem de 150 A e taxas de alimentação de pó da ordem de 9,7 g/min, reflete um desvio de partículas antes que estas atinjam a poça metálica, devido a alterações termo-cinemáticas do plasma (e no arraste das partículas) advindas do aumento da corrente. Pode-se pensar também na hipótese de vaporização. Todavia, como visto anteriormente, para pó utilizado, parte da literatura não suporta essa teoria [16, 35, 86].

Além disso, a Pm alcançada pela tocha com injeção interna é maior para maiores correntes, como se vê nas tabelas; ou seja, caso vaporização ocorresse, seria maior para esta tocha, que também impõe maior tempo de permanência do pó no arco.

A propósito, a maior Pm para injeção interna em maiores correntes advém de maiores tensões em relação à tocha com injeção externa e pode ser explicada pela ótica de Som [40]. O aumento da corrente causa aumento do diâmetro do arco e, então da área de contato com o bico constritor e com o bocal focalizador (este, ausente na injeção externa) e

das perdas para os mesmos. Contribui também o fato de que injeção do gás de arraste em um ponto mais alto do arco e num maior ângulo em relação a ele (ângulo de incidência de pó da tocha com injeção externa: 15°; ângulo de incidência de pó da tocha com injeção externa: 45°) retira mais calor do plasma. Diaz [9], ao medir a tensão para diferentes ângulos de incidência, também reporta resultados nesta direção.

Outra bateria de ensaios (Tabelas 5.10 e 5.11) teve como objetivo verificar o comportamento para uma taxa de alimentação de pó mais alta, da ordem de 11,5 g/min.

Tabela 5.10. Parâmetros de soldagem PTA-P para verificação da influência do tipo de tocha sobre a diluição – Tocha com injeção externa de material em pó (parâmetros elétricos medidos via SAP)

Im_1^* (A)	Um_1^* (V)	Pm_1^* (kW)		
192,7	28,8	5,5		
Im_2^* (A)	Um_2^* (V)	Pm_2^* (kW)		
152,3	27,4	4,2		
Im_3^* (A)	Um_3^* (V)	Pm_3^* (kW)		
113,4	23,6	2,7		
Im_4^* (A)	Um_4^* (V)	Pm_4^* (kW)		
73,6	21,7	1,6		
Vgpl (Ar) (l/min)	Vgprot (Ar) (l/min)	Vga (Ar) (l/min)	Vs (cm/min)	Vmpo (g/30s)
2,0	12,0	3,5	10,0	5,75
$\varnothing c$ (mm)	Re (mm)	$\varnothing e$ (mm)	DBP (mm)	Posição
4,0	3,5	4,0	13,0	plana
* valores medidos				

Tabela 5.11. Parâmetros de soldagem PTA-P para verificação da influência do tipo de tocha sobre a taxa de deposição – Tocha com injeção interna de material em pó (parâmetros elétricos medidos via SAP)

Im_1^* (A)	Um_1^* (V)	Pm_1^* (kW)		
191,4	34,7	6,6		
Im_2^* (A)	Um_2^* (V)	Pm_2^* (kW)		
151,5	30,4	4,6		
Im_3^* (A)	Um_3^* (V)	Pm_3^* (kW)		
112,3	27,6	3,1		
Im_4^* (A)	Um_4^* (V)	Pm_4^* (kW)		
73,1	24,1	1,8		
Vgpl (Ar) (l/min)	Vgprot (Ar) (l/min)	Vga (l/min) (Ar)	Vs (cm/min)	Vmpo (g/30s)
2,0	12,0	3,5	10,0	5,75
$\varnothing c$ (mm)	Re (mm)	$\varnothing e$ (mm)	DBP (mm)	Posição
4,0	3,5	4,0	13,0	plana
* valores medidos				

A Figura 5.34 mostra a variação da massa dos cordões depositados, lembrando que os mesmos têm 100,0 mm de comprimento, perfazendo 1 minuto de tempo de soldagem.

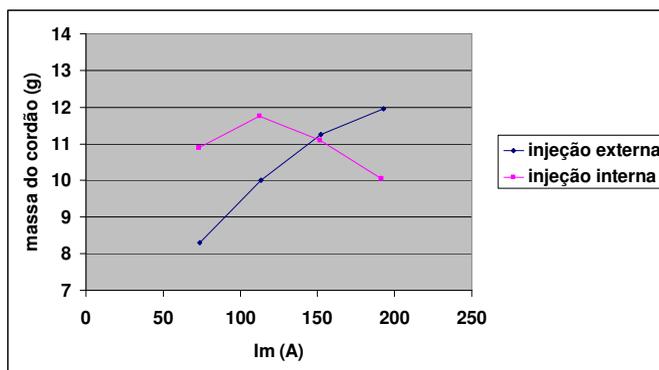


Figura 5.34. Massa dos cordões depositados em 1 minuto de soldagem

Neste caso, com maior taxa de alimentação, pode-se atribuir uma tendência à queda na taxa de deposição em maiores correntes ao desvio

de partículas de sua trajetória até poça, causado por diferenças nas condições de arraste do fluido plasma sobre o pó, para a tocha de alimentação interna. Maiores correntes resultariam em menor viscosidade (e menor velocidade das partículas) no centro do jato plasma, permitido que o pó o atravessasse sem ser arrastado à poça. Estes desvios também sofrem influência da velocidade das partículas no momento de injeção ao arco, segundo Pavlenko [35]. Outra hipótese é que ocorra um desvio nas zonas de maior viscosidade e maior velocidade das partículas (periferia), para maiores correntes. (Vale a pena neste ponto lembrar o gráfico da Figura 2.36.) A possibilidade de vaporização também pode ser considerada.

Por outro lado, se percebe a maior capacidade de deposição da tocha com injeção interna para menores correntes. Isto se explica pelo fato de que, neste caso, o pó é direcionado ao centro do arco em um ponto mais acima, numa região na qual as temperaturas são maiores (favorecendo troca térmica entre o plasma e as partículas). Conseqüentemente, a viscosidade é menor, assim como a velocidade das partículas, resultando em maior tempo de permanência do material no arco. Além disso, a menor viscosidade acarreta maior velocidade do plasma, o que também pode favorecer troca térmica, garantindo a fusão do pó, mesmo para menores potências. O resultado corrobora verificações de outros autores [30, 35, 68].

No caso de injeção externa, o material é injetado numa região na qual, para menores correntes, a temperatura proporciona menor viscosidade do plasma e, conseqüentemente, menor velocidade das partículas. Apesar de isso acarretar teoricamente em maior tempo da partícula dentro do plasma, a menor velocidade do jato plasma e a menor P_m resultam em menor taxa de fusão do pó. Desta maneira, este modelo de tocha tem sua capacidade de deposição (fusão de pó) mais dependente da própria potência do arco, numa razão direta. Para correntes de soldagem mais altas, o perfil de velocidades da Figura 2.36 indica aumento considerável da velocidade das partículas que se dirigem à poça pela região periférica do arco (e conseqüente menor tempo de permanência no arco), devido ao aumento na viscosidade. Não obstante, a maior P_m de soldagem e a maior velocidade do jato proporcionam troca térmica mais intensa, resultando em maior taxa de deposição.

Além dos fatores mencionados, há também que se considerar que a injeção interna força um único fluxo de pó apenas, concentrado ao longo do eixo do arco, ao passo que a injeção externa promove impingimento das partículas através de jatos individuais em regiões mais periféricas da poça. Deste modo, para correntes mais baixas e injeção exter-

na, se pode conjecturar também que um menor diâmetro da poça possa limitar a quantidade de partículas realmente incidentes sobre ela, colaborando para a menor taxa de deposição. Neste âmbito, há também implicações na geometria do cordão, a serem vistas no próximo item.

Ressalta-se que neste experimento houve contaminação do eletrodo para a tocha com injeção interna, dificultando abertura subsequente do arco piloto, o que não ocorreu para injeção externa. No primeiro caso o ponto focal da injeção de material está mais perto do eletrodo, o que pode aumentar a susceptibilidade à contaminação por partículas eventualmente desviadas por turbulências momentâneas locais ou pela própria colisão entre partículas.

Para análise do comportamento em taxas de alimentação substancialmente mais altas, foi realizada uma bateria de ensaios segundo a Tabela 5.12

Tabela 5.12. Parâmetros de soldagem PTA-P para verificação da influência do tipo de tocha sobre a taxa de deposição (sob maior taxa de alimentação) – Tocha com injeção interna de material em pó (parâmetros elétricos medidos via SAP)

Im_1^* (A)	Um_1^* (V)	Pm_1^* (kW)		
147,1	33,1	4,9		
Im_2^* (A)	Um_2^* (V)	Pm_2^* (kW)		
186,9	33,8	6,3		
Vgpl (Ar) (l/min)	Vgprot (Ar) (l/min)	Vga (l/min) (Ar)	Vs (cm/min)	Vmpo (g/30s)
2,0	12,0	3,5	10,0	8,75
\varnothing_c (mm)	Re (mm)	\varnothing_e (mm)	DBP (mm)	Posição
4,0	3,5	4,0	13,0	plana
* valores medidos				

Tabela 5.13. Parâmetros de soldagem PTA-P para verificação da influência do tipo de tocha sobre a taxa de deposição (sob maior taxa de alimentação) – Tocha com injeção externa de material em pó (parâmetros elétricos medidos via SAP)

Im_1^* (A)	Um_1^* (V)	Pm_1^* (kW)		
147,5	27,2	4,0		
Im_2^* (A)	Um_2^* (V)	Pm_2^* (kW)		
187,2	30,0	5,6		
V_{gpl} (Ar) (l/min)	V_{gprot} (Ar) (l/min)	V_{ga} (l/min) (Ar)	V_s (cm/min)	V_{mpo} (g/30s)
2,0	12,0	3,5	10,0	8,75
$\varnothing c$ (mm)	Re (mm)	$\varnothing e$ (mm)	DBP (mm)	Posição
4,0	3,5	4,0	13,0	plana
* valores medidos				

O gráfico seguinte, Figura 5.35, transcreve as massas depositadas sob as condições mencionadas, para cada uma das tochas.

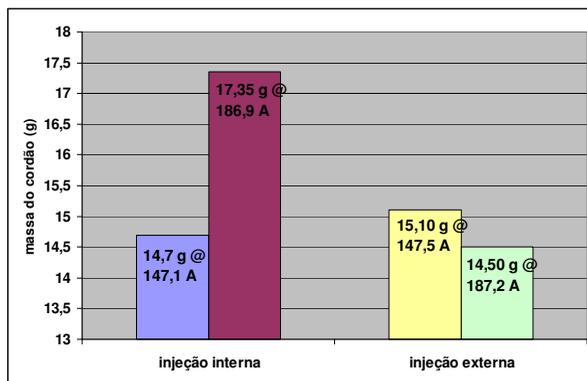


Figura 5.35. Massa dos cordões depositados em 1 minuto de soldagem, com as respectivas correntes médias medidas

Em relação à tocha com injeção interna, o nível de corrente mais baixo (cerca de 150 A) resultou em menor massa depositada na unidade de tempo. Isto, entretanto, não foi causado por menor capacidade de fusão do material (como visto anteriormente, este tipo de tocha tende a manter a capacidade de fusão, mesmo para correntes menores). A causa

foi um entupimento da tocha (obstrução dos orifícios de injeção de pó por material semi-fundido aderido, Figura 5.36) devido à maior taxa de alimentação fornecida pelo alimentador de pó.

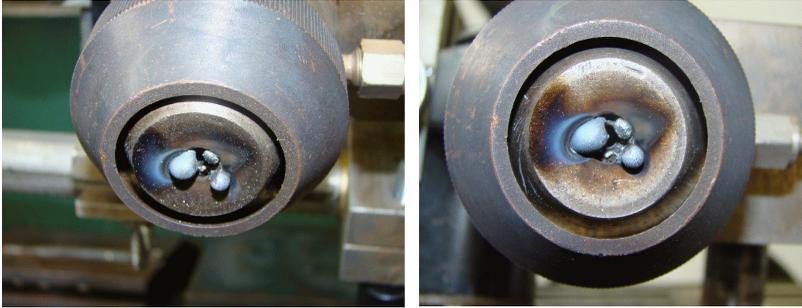


Figura 5.36. Tocha com injeção interna de pó e seus canais entupidos por material aderido

Ao se elevar a corrente, a taxa de deposição se restabeleceu. Supõe-se que a maior corrente de soldagem tenha proporcionado um perfil de velocidade do jato plasma e viscosidade do plasma que favoreceu o carreamento do pó a poça, para esta determinada taxa de alimentação. Talvez condições favoráveis pudessem ter sido alcançadas por alterações na vazão de gás de plasma. No entanto, esta verificação ficou fora do escopo deste trabalho.

Apesar da melhora observada, se verificou ainda ao final da solda, uma pequena quantidade de material aderido à tocha (Figura 5.37). De fato, a literatura reporta a maior tendência a entupimento [40] e maior susceptibilidade a desgaste [22] como desvantagens de tochas com injeção interna de pó.



Figura 5.37. Tocha com injeção interna de pó e material aderido

Em relação à tocha com injeção externa, se percebeu um pequeno entupimento da tocha, não comparável à magnitude da obstrução vista na Figura 5.36, em apenas um dos orifícios injetores, para corrente média aproximada de 150 A. Ao se elevar a corrente, se eliminou qualquer entupimento. Ainda assim, a taxa de deposição foi menor, característica que é intrínseca deste princípio construtivo de tocha, quando comparada à injeção interna ou central, como explanado anteriormente e mencionado também na literatura [22, 40].

5.4.2.2. Diluição e Geometria do Cordão

Em soldas de revestimento, a diluição é um dos aspectos mais relevantes quanto à qualidade do depósito. Como visto no Capítulo 2, seu valor depende de diferentes parâmetros e variáveis do processo PTA-P. um dos fatores de influência é a condição termo-cinética das partículas ao impingirem a poça metálica. Esta condição está sujeita, entre outros fatores, à forma como o pó é injetado ao arco, ou seja, da característica construtiva da tocha de soldagem.

Neste contexto, as soldas realizadas no âmbito do item anterior foram analisadas macrograficamente, e tiveram sua geometria e diluição determinadas, conforme a metodologia descrita no Capítulo 4. Sendo assim, a Figura 5.38 representa o comportamento da penetração máxima ($P_{máx}$), largura do cordão (L), altura do reforço do cordão (R) e diluição para taxa de alimentação da ordem de 9,5 g/min, assim como mostra as correntes médias medidas para cada caso.

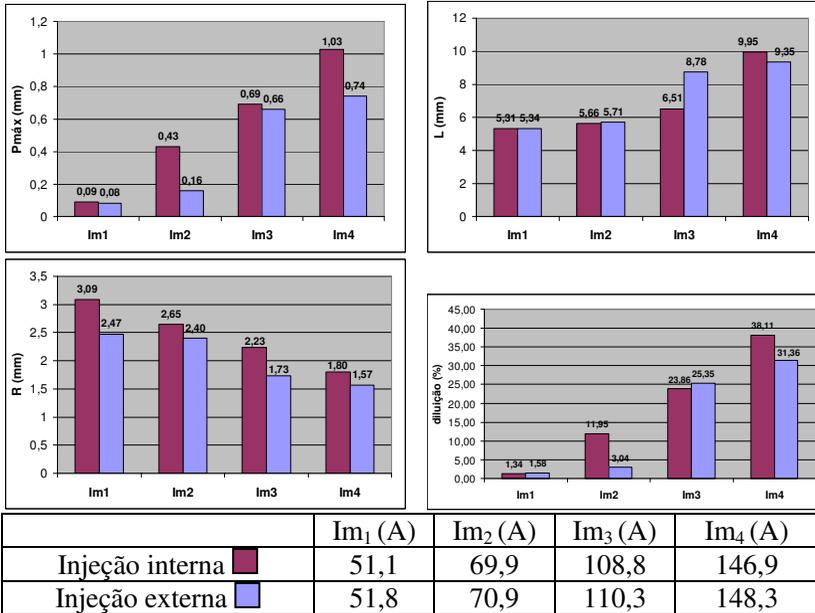


Figura 5.38. Geometria do cordão e diluição para os diferentes modelos de tocha de soldagem PTA-P quanto ao tipo de injeção de material para uma taxa de alimentação da ordem de 9,5 g/min

Evidencia-se que a tocha com injeção interna apresenta, para a dada taxa de alimentação de material, um comportamento mais gradativo, enquanto a outra tocha apresenta um salto na diluição de 3,04 % para 25,35 %.

Deve-se notar que o salto da diluição da injeção externa ocorre para uma corrente na qual a eficiência de deposição é similar para ambas as tochas, ou seja, numa região onde a comparação ocorre sob condições mais similares. Nesta região, a diluição é apenas um pouco menor para o modelo com injeção interna. Para corrente de soldagem de cerca de 150 A, a diluição se torna maior para injeção interna.

A Figura 5.39 mostra os resultados para taxa de alimentação da ordem de 11,5 g/min.

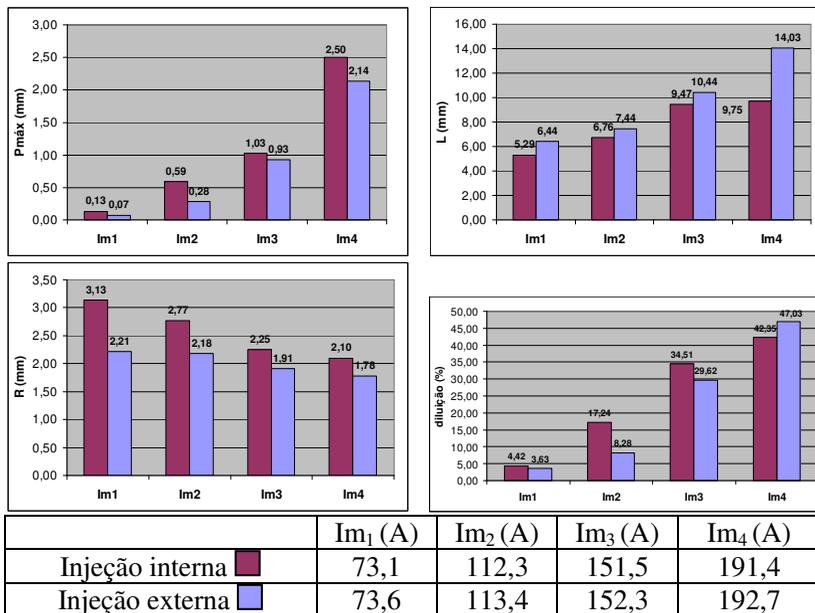


Figura 5.39. Geometria do cordão e diluição para os diferentes modelos de tocha de soldagem PTA-P quanto ao tipo de injeção de material para uma taxa de alimentação de 11,5 g/min

Para a corrente de cerca de 150 A, na qual a eficiência de deposição se iguala para os dois princípios construtivos de tocha PTA-P, notam-se características geométricas favoráveis, em se tratando de aplicações de revestimento, para a tocha com injeção externa (maior largura, e menor diluição). Apesar disso, os cordões de solda, representados na Figura 5.40, traduzem uma desvantagem da injeção externa, citada na literatura [22], que é maior susceptibilidade deste modelo a desbalanceamentos momentâneos no fluxo do fluido gás / pó entre os orifícios injetores, resultando em certa assimetria da seção transversal (principalmente para 190 A). Vê-se, da mesma maneira, a tendência à penetração “finger shape” da injeção interna (maior $P_{máx}$, mesmo para menor diluição, em 190 A).

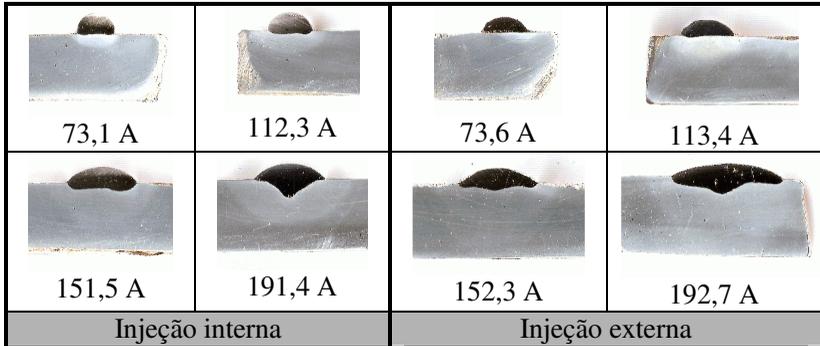


Figura 5.40. Comparação geométrica da seção transversal – tocha PTA-P com injeção interna x tocha PTA-P com injeção externa e respectivas correntes médias

A análise para uma taxa de alimentação da ordem de 17,5 g/min resultou nos gráficos da Figura 5.41.

Lembra-se que a eficiência de deposição para esta taxa de alimentação foi maior para injeção interna, quando não houve entupimento da tocha. Mesmo assim, prevaleceu a maior tendência deste modelo em causar maior diluição.

Percebe-se coerência com a literatura ([9, 10, 61]) no que tange à redução da diluição com aumento da taxa de alimentação de pó, para mesmas correntes de soldagem.

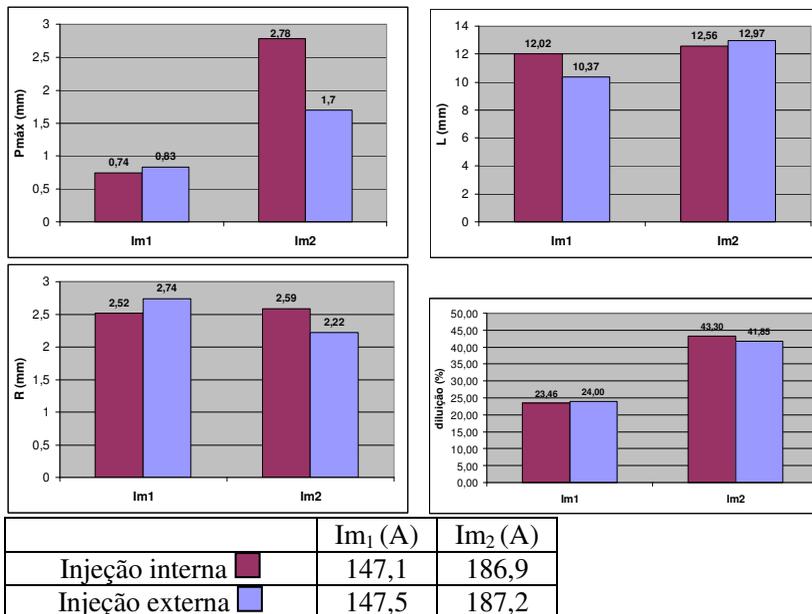


Figura 5.41. Geometria do cordão e diluição para os diferentes modelos de tocha de soldagem PTA-P quanto ao tipo de injeção de material para uma taxa de alimentação de 17,5 g/min

5.4.2.3. Soldagem de pós de diferentes morfologias

Um dos projetos em desenvolvimento concomitante ao presente trabalho no LABSOLDA trata especificamente da formulação de ligas metálicas em pó para PTA-P, com ênfase em Metalurgia da Soldagem. No contexto deste projeto paralelo, são utilizadas, a priori, ligas em pó obtidas por trituração e mistura.

Em trabalho similar anterior [49], já tinha havido dificuldade na injeção de pó, pois partículas semi-fundidas tendiam a aderir ao bico constritor, obstruindo os orifícios injetores. O problema se repetiu nos trabalhos atuais. Isto se deve à combinação de faixa granulométrica muito ampla e morfologia irregular do pó (LO3*) (a heterogeneidade da composição química e ponto de fusão das partículas também pode ter contribuído). A tocha utilizada em [49] foi desenvolvida em [9], com injeção externa, ângulo de injeção de 60° e dois orifícios injetores.

Alguns autores afirmam que tochas com injeção interna têm capacidade de fundir pós de maiores dimensões, pois as partículas permane-

cem mais tempo dentro de regiões mais quentes do arco [22, 40]. Assim, os mesmos parâmetros de soldagem regulados (Tabela 5.14) foram mantidos e se tentou soldar com uma tocha deste modelo. Foi utilizado o alimentador de pó comercial PM-PF-10 e o princípio “venturi” para transporte do pó.

Tabela 5.14. Parâmetros de soldagem PTA-P regulados para soldagem de material em pó obtido por trituração e mistura (LO3*) e tocha com injeção interna de material

Ip (A)	tp (s)			
260	0,5			
Ib (A)	tb (s)	Vga (l/min) (Ar)		
80	0,5	4,0		
Vgpl (Ar) (l/min)	Vgprot (Ar) (l/min)	VgADP (l/min) (Ar)	Vs (cm/min)	Vmpo (kg/h)(g/min)
2,0	15,0	1,0	6,4	0,38 (6,3)
Øc* (mm)	Re (mm)	Øe (mm)	DBP (mm)	Posição
4,8 / 4,0	2,4	4,0	10,0	plana
* tocha com injeção externa ângulo de 60° e dois orifícios / tocha com injeção interna				

O resultado não foi satisfatório, devido ao entupimento dos canais de injeção de pó da tocha com alimentação interna, como mostra a Figura 5.42. Isto leva a crer que as conclusões da literatura foram baseadas em condições diferentes de soldagem para cada tipo de tocha (vazão de gás de plasma, de arraste, corrente, etc.) e, possivelmente, sempre com pós atomizados (esféricos). Como visto anteriormente, uma possível solução para o entupimento seria aumento da corrente de soldagem, o que, por outro lado, acarretaria em maior diluição.

A repetição dos parâmetros para a tocha com injeção externa com quatro orifícios injetores e ângulo de injeção de 15° enfatizada no presente trabalho (PTS3) se mostrou livre de entupimento.



Figura 5.42. Canais obstruídos por material aderido à tocha com injeção interna de pó – material: LO3* (triturado e misturado)

5.4.2.4. Resultados comparativos

A partir destes resultados, se traçou qualitativamente (os critérios podem variar para diferentes aplicações) o gráfico em rede para cada tocha testada (Figura 5.43). (O quesito compacticidade levou em consideração a capacidade de corrente das tochas, vide Figura 4.2. Uma tocha manual com injeção interna de dimensões comparáveis às da tocha manual com injeção externa utilizada no presente trabalho tem, segundo seu fabricante, cerca de 40 % da capacidade de corrente da segunda, num ciclo de trabalho de 100 %) Esta análise direcionou a adoção da tocha com injeção externa de material metálico em pó como padrão para aplicação prática.

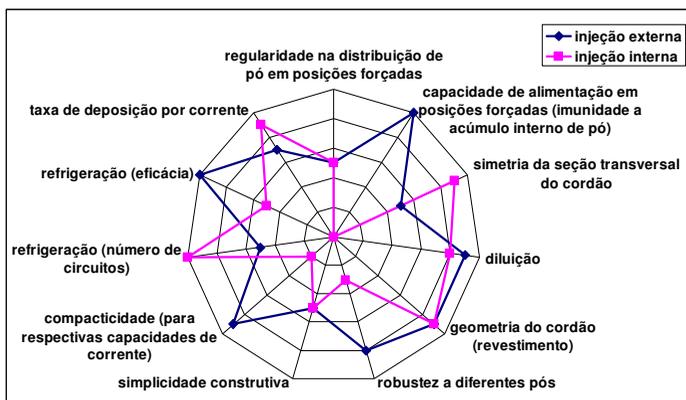


Figura 5.43. Gráfico em rede do desempenho das tochas de soldagem PTA-P com injeção interna externa de pó

5.4.2.5. Melhorias conceitualizadas

Tendo-se decidido por um modelo de tocha PTA-P quanto ao tipo de injeção de pó, outros fatores foram considerados para melhorias em seu projeto. Um deles foi a refrigeração do bocal do gás de proteção. Como no processo MIG, a adesão de material de adição neste bocal pode trazer prejuízos como menor vida útil da tocha, perturbações e redução da eficiência da proteção gasosa, necessidade de parada para limpeza, etc. Enquanto no caso do MIG este problema é relativamente muito comum e advém principalmente de respingos pela repulsão de gotas em transferência para a peça, no PTA-P com injeção externa ele foi observado com menor intensidade e apenas sob condições adversas, por turbulências (borbulhamento) na poça.

Apesar da baixa tendência do PTA-P em gerar respingos, foi decidido por se forçar condições desfavoráveis de soldagem para obtê-los e assim, se poder avaliar o efeito da refrigeração do bocal de proteção. Como visto no item 2.4.1, recomenda-se em [24] a refrigeração do bocal de proteção para redução da adesão de partículas, ou aglomerados de partículas, semi-fundidas (no citado trabalho, foi aplicado uma variação do PTA-P, com adição de arame, que pode ter levado à contaminação intensa do bocal de proteção por adesão de respingos, havendo sensível melhora com refrigeração do mesmo).

Para as condições ensaiadas no presente trabalho, não foi possível observar influência substancial da refrigeração na manutenção da integridade do bocal do gás de proteção, em relação a material aderido, que se manteve baixo. O dispositivo de refrigeração construído pode ser visto na Figura 5.44 e os resultados (e condições dos testes) na Figura 5.45 (os parâmetros utilizados foram buscados com o intuito de forçar turbulência na poça e produção de respingos).

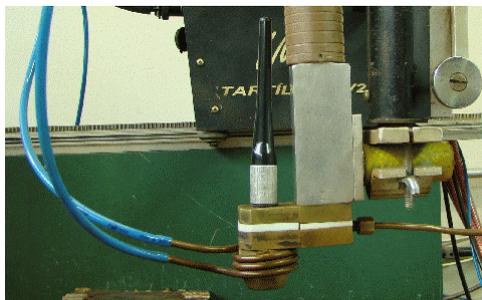


Figura 5.44. Serpentina de refrigeração externa do bocal do gás de proteção (unidade de refrigeração UR 2)

Sem refrigeração do bocal do gás de proteção		Com refrigeração do bocal do gás de proteção	
			
Im (A)	152,1	Im (A)	152
Um (V)	34,4	Um (V)	34,4
Pm (kW)	5,2	Pm (kW)	5,3
Vmpo (g/min)	9,95	Vmpo (g/min)	9,95
Vgp (l/min)	2,0 (Ar)	Vgp (l/min)	2,0 (Ar)
Vga (l/min)	3,5 (Ar+20%N ₂)	Vga (l/min)	3,5 (Ar+20%N ₂)
Vgprot (l/min)	12,0 (Ar+25%He)	Vgprot (l/min)	12,0 (Ar+25%He)

Figura 5.45. Verificação da influência da refrigeração do bocal do gás de proteção na integridade do mesmo

A Figura 5.46 adiante ilustra inovações na tocha PTA-P com injeção externa, que tiveram seu conceito ainda dentro do escopo deste trabalho, mas ainda não foram testadas. Elas se encontram, no entanto, no momento de confecção deste texto, em fabricação para testes, ajustes e validação.

A nova geometria reduz o número de operações de brasagem necessárias, facilitando a construção. Além disso, se visa integrar os circuitos de refrigeração, reduzindo seu número a um, sem, no entanto, prejuízos à capacidade de refrigeração do bico constritor. Isto demandará uma unidade de refrigeração de maior potência ou que controle a temperatura (*chiller*). Apesar disso, se reduz o número de componentes do sistema. Para algumas das aplicações citadas, a possibilidade de tornar o sistema mais compacto e simples pode ser decisiva quando da tomada de decisão pela implantação de um processo, como por exemplo, no interior de caldeiras de termelétricas, de usinas hidrelétricas e em estaleiros.

Ainda com o requisito de maior simplicidade de operação em mente, se projetou um método de fixação do bico constritor que elimina a exigência da utilização de chaves e retirada de parafusos para sua retirada e reposição. O bico constritor tem vida útil limitada e também está exposto, principalmente nos ambientes citados, a danos. Sendo assim sua troca deve permitir agilidade.

Uma terceira adaptação diz respeito à criação de uma câmara anelar de distribuição do pó, quando este sai do corpo da tocha e adentra o bico constritor. Esta câmara permite a utilização de bicos constritores com números e disposições diferentes de bicos injetores. Tal flexibilidade é interessante para investigações com diferentes materiais, taxas de alimentação

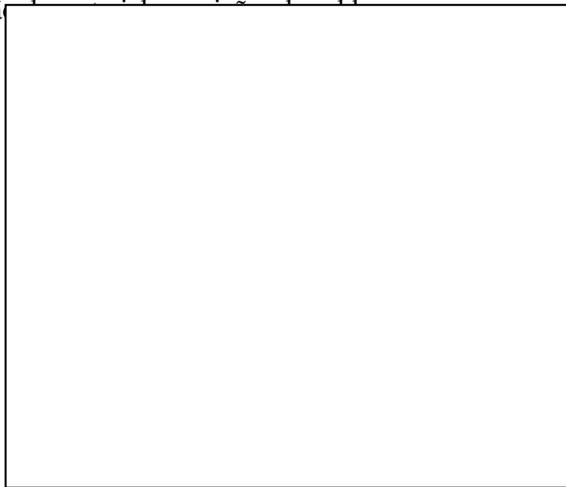


Figura 5.46. Inovações no projeto da tocha PTA-P

5.5. Parâmetros e modos de soldagem

Como apresentado no Capítulo 2, diversos trabalhos abordaram estudos acerca da influência dos parâmetros da soldagem PTA-P sobre os resultados. Frequentemente, no entanto, não se explicitam todas as condições sob as quais os ensaios foram realizados. Somado a isso, há uma profusão de aplicações e princípios construtivos e funcionais dos equipamentos utilizados. Sendo assim, apesar de as informações adquiridas serem importantes para comparação de resultados e norteamto das atividades, alguns fatores já abordados na literatura foram novamente estudados no escopo da presente tese, sob tentativa de maior clareza dos critérios.

5.5.1. Soldagem Pulsada

5.5.1.1. Comparações de soldagem em corrente constante e pulsada, em correntes médias similares à constante

Como comentado no item 2.9, a pulsação da corrente no processo PTA-P, assim como em outros processos a arco, pode trazer benefícios macro (controlabilidade da poça, estabilidade do arco, redução de distorção) e microestruturais (refino de grão, homogeneidade de dispersão de partículas e de distribuição de composição química).

Com o intuito de verificar o efeito do modo pulsado e compará-lo com o efeito da utilização de tecimento (oscilação mecânica da tocha) sobre as características da solda, parâmetros dinâmicos de pulsação similares aos do tecimento foram escolhidos, conforme a Tabela 5.15, para duas diferentes configurações (o efeito do tecimento é descrito no item 5.5.2, adiante).

Tabela 5.15. Parâmetros de soldagem PTA-P pulsada. Parâmetros dinâmicos de pulsação (frequência) similares aos de tecimento, Tabela 5.18 (parâmetros elétricos medidos via SAP)

Sem pulsação			Pulsação 1			Pulsação 2		
Im ₁ * (A)	Um ₁ * (V)	Pm ₁ * (kW)	Im ₁ * (A)	Um ₁ * (V)	Pm ₁ * (kW)	Im ₁ * (A)	Um ₁ * (V)	Pm ₁ * (kW)
152,5	25,4	3,9	152,6	25,8	4	153	26,3	4,1
			Ip*	Ib*	tp (s)	Ip	Ib	tp (s)
			192,0	113,0	0,17	192,0	113,0	0,9
			tb (s)			tb (s)		
			0,17			0,9		
Vgpl (l/min)		Vgprot (l/min)	Vga (l/min)		Vs (cm/min)		Vm _{po} (g/min)	
2,0 (Ar)		12,0 (Ar)	3,5 (Ar)		10,0		16,8	
Øc (mm)		Re (mm)	Øe (mm)		Posição		DBP (mm)	
4,0		3,5	4,0		plana		13,0	
* valores medidos								

O efeito sobre possível melhoria na homogeneidade da composição química do metal de solda pela agitação da poça foi avaliado por intermédio da medição da composição química em diferentes pontos da seção transversal (superior, inferior, laterais e central) e cálculo do desvio padrão do teor de Cr, em relação à média do cordão. Verificou-se, conforme Tabela 5.16, que soldagem pulsada contribui, por intermédio do agitação da poça, para melhor homogeneidade na composição química do cordão.

Tabela 5.16. Homogeneidade da distribuição da composição química na seção transversal do cordão de solda com pulsação

Desvio padrão do teor de Cr para diferentes pontos da seção transversal, em relação à média		
Constante	Pulsado 1	Pulsado 2
0,21 %	0,12 %	0,10 %

Como mostra a Figura 5.47, se observa queda na taxa de deposição para a primeira configuração do modo pulsado, o que não se repetiu para pulsação em menor frequência. Como as corrente médias se mantiveram similares, se levanta a hipótese de que o primeiro caso pulsado resulte em dispersão das partículas, devido a mudanças em mais alta frequência no perfil cinemático do jato plasma.

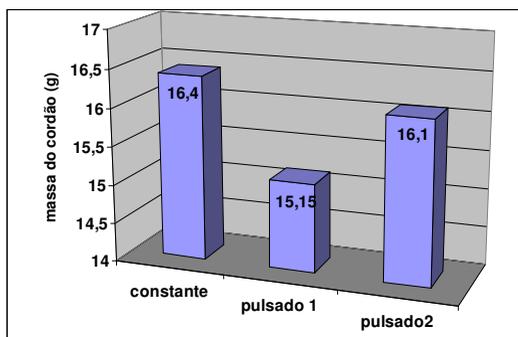


Figura 5.47. Massa dos cordões depositados em 1 minuto de soldagem para diferentes condições de soldagem pulsada e em corrente constante, segundo a Tabela 5.15

O impacto da pulsação sobre as características geométricas do cordão pode ser comparativamente observado na Figura 5.48.

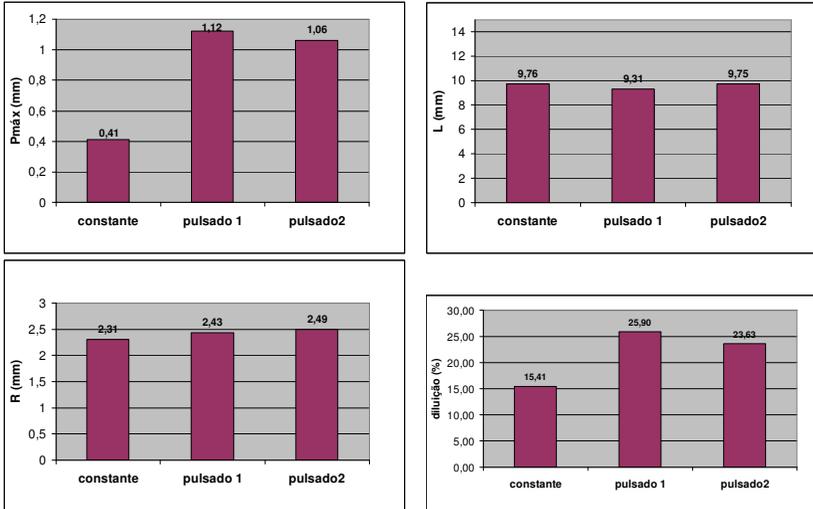


Figura 5.48. Geometria do cordão e diluição para soldagem sem pulsação e com diferentes condições de pulsação, conforme procedimento da Tabela 5.15

Os menores valores de Le R da soldagem sob “pulsado 1”, assim como seus maiores valores de P_{máx} e diluição, podem ser atribuídos à sua menor taxa de deposição. Quanto às diferenças entre o modo “constante” e o “pulsado 2”, se podem atribuir à corrente de pulso, que, nos momentos em que atua, causa maiores P_{máx} e diluição. A adequação da taxa de alimentação à pulsação da corrente, ou seja, pulsação do pó, poderia trazer, neste contexto, melhorias no resultado.

5.5.1.2. Comportamento da taxa de deposição e características geométricas da solda para soldagem pulsada e constante, nas correntes de pulso e base

A investigação do efeito da pulsação sobre a taxa de deposição levou à determinação de uma maior relação I_p/I_b , no intuito de se majorá-lo (Tabela 5.17).

Conforme se observa na Figura 5.49, surgem diferentes taxas de deposição. A corrente de 200 A deposita mais material que 80 A, enquanto a soldagem pulsada entre estes dois patamares deposita um valor intermediário. Este resultado reforça a plausibilidade de maiores inves-

tigações de pulsação sincronizada de material de adição e corrente de soldagem.

Tabela 5.17. Parâmetros de soldagem PTA-P pulsada e em corrente constante (parâmetros elétricos medidos via SAP)

Constante 1			Pulsado			Constante 2		
Im_1^* (A)	Um_1^* (V)	Pm_1^* (kW)	Im^* (A)	Um^* (V)	Pm^* (kW)	Im_2^* (A)	Um_2^* (V)	Pm_2^* (kW)
195,7	27,4	5,4	135,8	23,5	3,4	74,4	21,8	1,6
			Ip^* (A)	Ib^* (A)				
			197,0	74,0				
			tp (s)	tb (s)				
			0,9	0,9				
Vgpl (l/min)		Vgprot (l/min)		Vga (l/min)		Vs (cm/min)		Vmpo (g/min)
2,0 (Ar)		12,0 (Ar)		3,5 (Ar)		10,0		17,3
Øc (mm)		Re (mm)		Øe (mm)		Posição		DBP (mm)
4,0		3,5		4,0		plana		13,0

* valores medidos

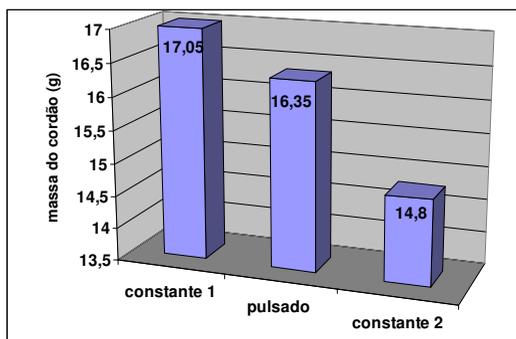


Figura 5.49. Massa dos cordões depositados em 1 minuto de soldagem para diferentes condições de soldagem pulsada e em corrente constante, segundo a Tabela 5.17

As características geométricas dos cordões podem ser comparativamente observadas na Figura 5.50 (e os aspectos superficiais na Figura 5.51), evidenciando um comportamento intermediário para pulsação da corrente entre estes dois valores de correntes constantes.

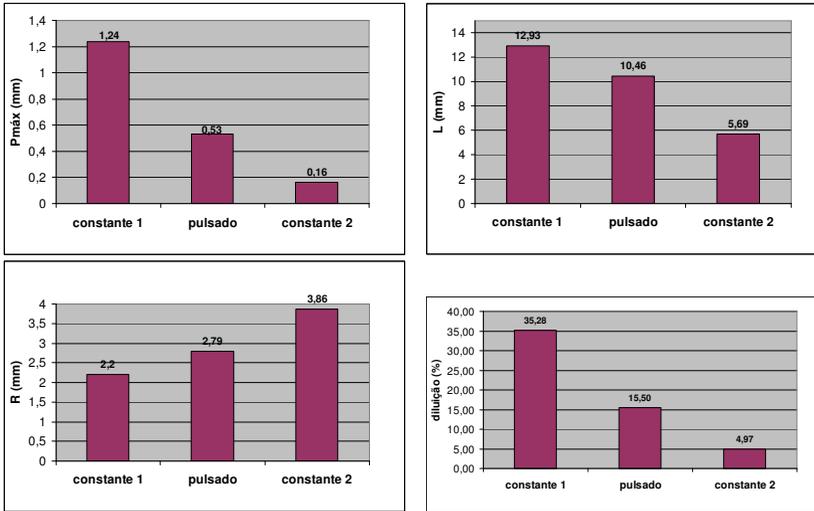


Figura 5.50. Geometria do cordão e diluição para soldagem em modo pulsado e constante, com as correntes de pulso e de base do modo pulsado, conforme Tabela 5.17

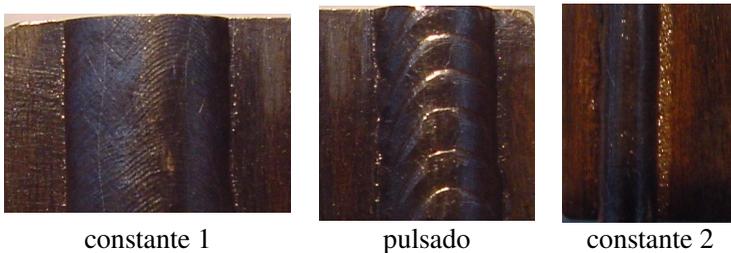


Figura 5.51. Aspectos superficiais das soldas relativas à Tabela 5.17 (soldagem pulsada)

5.5.2. Tecimento

O parâmetro tecimento já teve seu efeito geométrico e microestrutural estudado no LABSOLDA em outro trabalho [9], resultando em maior largura (quanto à influência sobre a diluição, não houve uma análise conclusiva, embora resultados apontem para aumento da diluição, com tecimento de pequena amplitude). Sua influência sobre a homogeneidade da composição química não foi investigada. Além disso, foi utilizado outro projeto de tocha PTA-P.

Ensaio sem e com tecimento (em duas regulagens diferentes), cujos parâmetros se encontram na Tabela 5.18, seguidos da análise química em diferentes pontos da seção transversal do cordão, mostram que há neste quesito também um efeito benéfico desta técnica (Tabela 5.19), pois se observa maior homogeneidade da composição química no metal de solda. Ao se efetuar uma comparação com os resultados para soldagem pulsada, se vê que naquele caso o efeito é mais pronunciado. O depósito de partículas duras, como WC ou VC, pode se beneficiar também deste fator. Fica a sugestão para experiências futuras a esse respeito.

Tabela 5.18. Parâmetros de soldagem PTA-P sem e com tecimento, em duas regulagens diferentes de tecimento (parâmetros elétricos medidos via SAP)

Sem tecimento			Tecimento 1			Tecimento 2		
Im ₁ * (A)	Um ₁ * (V)	Pm ₁ * (kW)	Im ₁ * (A)	Um ₁ * (V)	Pm ₁ * (kW)	Im ₁ * (A)	Um ₁ * (V)	Pm ₁ * (kW)
152,5	25,4	3,9	152,7	25,1	3,8	152,3	24,6	3,8
A (mm)	f (Hz)		A (mm)	f (Hz)		A (mm)	f (Hz)	
-	-		7,5	3		7,5	0,5	
Vgpl (l/min)		Vgprot (l/min)		Vga (l/min)		Vs (cm/min)		Vmpo (g/min)
2,0 (Ar)		12,0 (Ar)		3,5 (Ar)		10,0		16,8
Øc (mm)		Re (mm)		Øe (mm)		Posição		DBP (mm)
4,0		3,5		4,0		plana		13,0

* valores medidos

Tabela 5.19. Homogeneidade da distribuição da composição química na seção transversal do cordão de solda com tecimento

Desvio padrão do teor de Cr para diferentes pontos da seção transversal, em relação à média		
Sem tecimento	Tecimento 1	Tecimento 2
0,21 %	0,20 %	0,16 %

A Figura 5.52 evidencia que a taxa de deposição sofre uma queda para um tecimento mais rápido (maior frequência). Deve-se lembrar que efeito similar ocorre para a soldagem pulsada, Figura 5.47. Pode-se atribuir esta queda ao desvio de uma porção considerável das partículas injetadas de sua trajetória até a poça quando a tocha atinge as extremidades do tecimento e inverte bruscamente seu sentido de movimento. Durante a solda, é possível notar a olho nu este fenômeno.

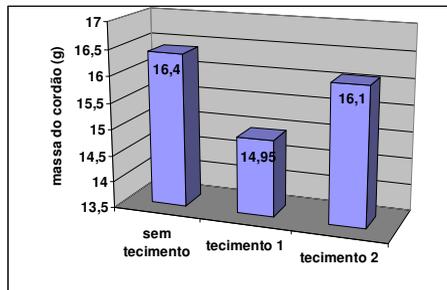


Figura 5.52. Massa dos cordões depositados em 1 minuto de soldagem para diferentes condições, segundo a Tabela 5.18

O impacto do tecimento sobre as características geométricas do cordão pode ser comparativamente observado na Figura 5.53.

Nota-se que existe um esperado aumento da largura do cordão, que se pronuncia mais para menor frequência de tecimento. Isto pode advir da maior taxa de deposição neste caso e da menor velocidade transversal da tocha. Contava-se de antemão também com a queda de R, pois o material é espalhado sobre maior área, quando há tecimento. Manteve-se similar, no entanto, para diferentes frequências de tecimento. Poder-se-ia esperar maior R para maior frequência, já que a L se mostrou menor. No entanto a taxa de deposição foi menor.

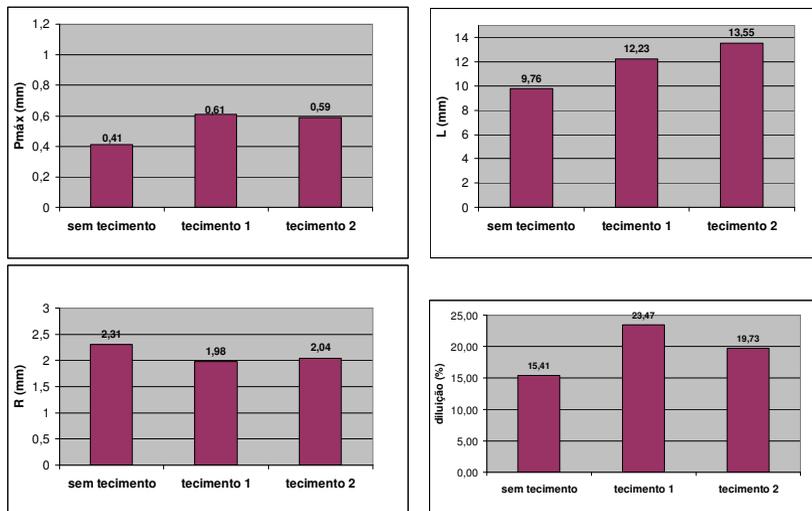


Figura 5.53. Geometria do cordão e diluição para soldas sem tecimento e com diferentes condições de tecimento, conforme Tabela 5.18

Um resultado não tão esperado surgiu da análise da diluição e penetração.

Alguns autores mencionam valores otimizados de diluição (menores que 5,0 %) para operações com tecimento [9, 41, 61]. O presente trabalho observou, ao contrário, maior diluição para soldagem com tecimento. Acredita-se que a discrepância ocorre devido à diferença nos parâmetros de tecimento entre o presente trabalho e os outros.

Todos os três trabalhos citados utilizaram faixas relativamente altas de amplitude de tecimento (20,0; 20,0 e 40,0 mm respectivamente) que, em combinação com a frequência, resultaram em altas velocidades transversais da tocha: 100,0 cm/min (0,4 Hz) [41] e 108,0 cm/min (0,225 Hz) [61] (Diaz não informa este dado, mas pelos resultados, acredita-se ser próximo). Assim, poder-se-ia aventar como um dos motivos para a menor diluição encontrada nos outros trabalhos a alta velocidade transversal da tocha. O efeito de redução de penetração e diluição para maiores velocidades foi verificado em [9] para soldas sem tecimento.

Porém ao se calcularem as velocidades transversais obtidas no presente trabalho, se vê que, apesar de o “tecimento 2” ter resultado em

45,0 cm/min, o “tecimento 1” resultou em 270,0 cm/min, ou seja, maior que os valores dos outros trabalhos.

Desta maneira, pode-se recorrer aos resultados de Marconi [16] (Figura 5.54), e considerar a explicação de que, como na soldagem com tecimento a altura (ou espessura) do depósito cai, há maior eficiência na transferência de calor do arco para o substrato sob a poça, e assim maior penetração e diluição. Ambas aumentam, adicionalmente, para maior frequência de tecimento, pois a fonte de calor (arco) ataca com maior frequência cada ponto da seção transversal.

E então, somente acima de uma determinada amplitude, o fator velocidade transversal de soldagem, se sobreporia a estes efeitos, configurando-se analogamente uma sucessão de pequenos cordões transversais a alta velocidade (e assim, baixa penetração e diluição). Os efeitos devem ser diferentes para diferentes materiais. Pretende-se, fora do escopo do presente trabalho, realizar esta verificação para aços com diferentes propriedades termofísicas.

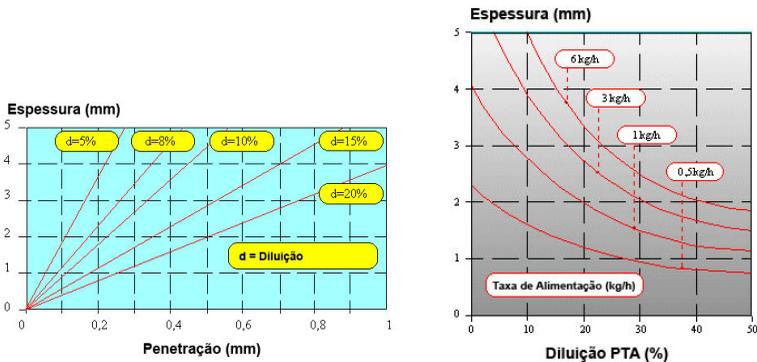


Figura 5.54. Comportamento da penetração e diluição de acordo com a espessura do cordão [16]

Adicionalmente, vale citar que Diaz [9] obteve menor diluição para uma tocha com ângulo de injeção de pó de 30° do que com 60° , em soldagem com tecimento. Apesar de não ser ter levantado uma hipótese naquele trabalho quanto a isso, o melhor desempenho quanto à diluição, sob tecimento, da tocha de 30° poderia ser atribuído à menor intensidade de desvio de pó nas extremidades do tecimento, quando a tocha muda bruscamente de sentido de movimento. Este desvio de pó reduziria mo-

mentaneamente a taxa de deposição, contribuído, então, para aumento da diluição, como comentado anteriormente.

5.5.3. Distância entre o bico constritor e a peça (DBP)

Em procedimentos mecanizados, a DBP é um dos parâmetros a serem regulados. Na soldagem PTA-P, além de influenciar a própria tensão e potência de soldagem, esta distância também determina a região onde as partículas alimentadas atingirão a peça, ou seja, acima, abaixo ou sobre o ponto focal dos jatos de pó.

Deuis [10] e Faroldi [78] abordam esta questão, sob pontos de vista diferentes, como comentado no Capítulo 2. Para revestimentos, Faroldi [78] recomenda que o ponto focal seja posicionado acima da poça, a meia distância do bico constritor, enquanto em [65] se recomenda uma DBP similar à distância focal do pó e Díaz [9] mostra melhores resultados com um ângulo de injeção de pó que resulta em ponto focal na poça. DBPs menores que a distância focal do pó não foram testadas, pois haveria tendência de maior diluição, assim como de partículas atingindo o substrato fora da poça metálica. Estes fatores são corroborados em [78], que recomenda tal configuração para soldas de união, onde a penetração deve ser maior, chamando a atenção para o possível problema de desperdício de pó caso a poça seja pequena. Adicionalmente, mostra-se que isotermas de maior temperatura [16], assim como maiores velocidades [101] do jato plasma atingiriam a peça.

Para verificação deste parâmetro, foram realizados ensaios de soldagem para dois valores de corrente e três diferentes DBPs, conforme Tabela 5.20.

Tabela 5.20. Parâmetros de ensaios de soldagem para verificação da influência da DBP na soldagem PTA-P (valores medidos via SAP)

DBP = 13,0 mm			DBP = 15,0 mm			DBP = 17,0 mm		
Im ₁ * (A)	Um ₁ * (V)	Pm ₁ * (kW)	Im ₁ * (A)	Um ₁ * (V)	Pm ₁ * (kW)	Im ₁ * (A)	Um ₁ * (V)	Pm ₁ * (kW)
73,6	21,7	1,6	73,3	23,5	1,7	73,0	25,5	1,9
Im ₂ * (A)	Um ₂ * (V)	Pm ₂ * (kW)	Im ₂ * (A)	Um ₂ * (V)	Pm ₂ * (kW)	Im ₂ * (A)	Um ₂ * (V)	Pm ₂ * (kW)
113,4	23,6	2,7	112,9	26,6	3,0	112,8	27,9	3,2
Vgpl (l/min)		Vgprot (l/min)	Vga (l/min)		Vs (cm/min)		Vm _{po} (g/min)	
2,0 (Ar)		12,0 (Ar)	3,5 (Ar)		10,0		11,5	
Øc (mm)	Re (mm)	Øe (mm)		Posição				
4,0	3,5	4,0		plana				
* valores medidos								

A Figura 5.55 mostra que houve maior taxa de deposição para correntes da ordem de 115 A e que não se demonstrou aumento gradual, nesta corrente, para os três valores de DBPs regulados. Isto indica provavelmente o limite de fusão (dentro das condições de soldagem) para esta corrente de soldagem ou até a possível formação de um perfil de trajetória das partículas que desvie certa porção de seu caminho até a tocha, como conjecturado anteriormente. Já para correntes da ordem de 75 A, houve aumento gradual da taxa de deposição, cuja causa acredita-se ser o resultante aumento gradual da potência de soldagem. Ou seja, os resultados indicam que a possibilidade de aumento da taxa de deposição via aumento da DBP é dependente da corrente de soldagem.

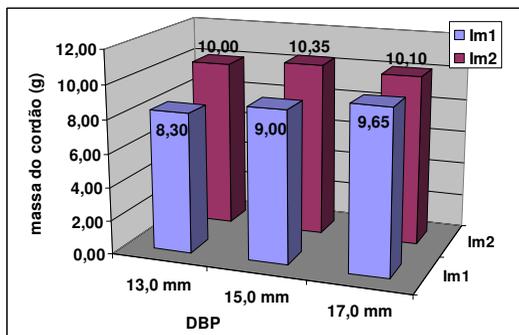


Figura 5.55. Massa dos cordões depositados em 1 minuto de soldagem (Im1: cerca de 75 A; Im2: cerca de 115 A, conforme Tabela 5.20)

Resta analisar o impacto da variação na DBP sobre as características geométricas da solda. As medições se encontram na Figura 5.56.

Para corrente de 75 A, primeiramente se observa aumento na $P_{máx}$, R e diluição com a DBP, o que se atribui ao aumento da potência de soldagem concomitante ao aumento da taxa de deposição. Observou-se queda em L, que pode também ter sido causada por falta de molhabilidade pelo aumento da taxa de deposição. No entanto, ao se incrementar em adicionais 2,0 mm a DBP, surge o efeito contrário, com queda nos valores de $P_{máx}$ e diluição. Uma hipótese é a preponderância, nas dadas condições, da influência do aumento da taxa de deposição sobre a influência da potência de soldagem na geometria da solda. L aumenta e R continua crescente, novamente talvez pela redução da molhabilidade.

No caso de correntes da ordem de 115 A nota-se uma dependência direta da geometria em relação às variações na potência de soldagem advindas de aumento na DBP. L e R não sofreram, no entanto, alterações tão significativas como a $P_{máx}$ e a diluição. Portanto, se tem uma indicação de que DBPs mais próximas da distância focal dos jatos de pó seriam mais recomendáveis do ponto de vista de aplicações de revestimento.

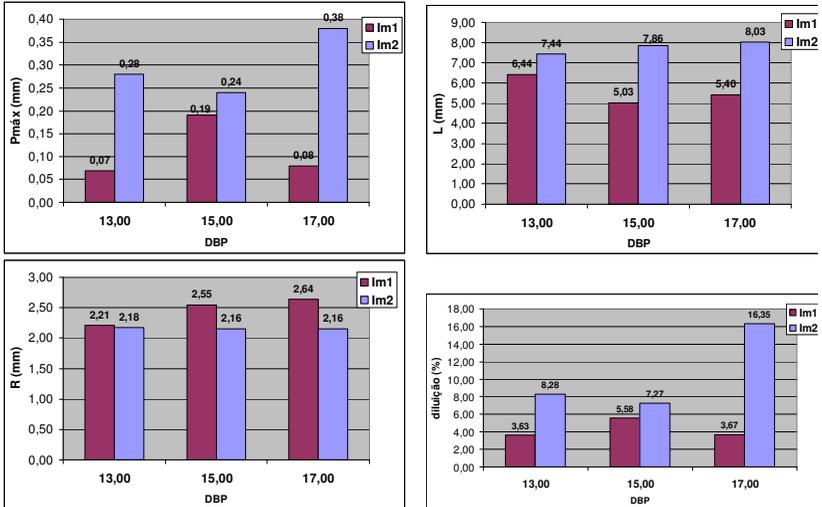


Figura 5.56. Geometria do cordão e diluição para diferentes DBPs e uma taxa de alimentação de 11,5 g/min (Im1: cerca de 75 A; Im2: cerca de 115 A, conforme Tabela 5.20)

5.6. Concentração de energia

Uma das vantagens mais largamente mencionadas do PTA-P é sua relativa alta concentração de energia. Na realidade industrial, no entanto, processos com alta concentração de energia (Laser, Feixe de elétrons, o próprio Plasma) são relacionados a aplicações que requerem alta penetração e/ou velocidade de soldagem. O PTA-P é um processo basicamente de revestimento, que visa baixas diluições, geralmente deve recobrir uma área relativamente grande (ou seja, quanto menor a fonte de energia, maior o tempo da operação) e não é executado em altas velocidades longitudinais de soldagem.

Uma única menção direta a esta questão foi encontrada na literatura referenciada, a qual relaciona a alta concentração de energia do processo PTA-P à sua alta capacidade de fusão de material adicionado [93].

Neste contexto, se formularam e realizaram ensaios com variações em parâmetros de influência sobre a concentração de energia. Primeiramente, se realizou uma solda (na realidade uma simulação), com parâmetros de soldagem Plasma Keyhole previamente desenvolvidos no

LABSOLDA sobre um corpo de prova igual aos utilizados para os estudos acerca do PTA-P (Tabela 5.21). A diferença crucial, no que tange à concentração de energia, é a vazão do gás de plasma. Em seguida, se utilizaram os mesmos parâmetros e se adicionou material em pó (316 L), numa taxa de 16,2 g/min (Keyhole+pó). Prosseguiu-se com teste a 32,4 g/min (Keyhole++pó). Para finalizar, se mantiveram os parâmetros e se reduziu a vazão de gás de plasma para 2,0 l/min (PTA-P).

Tabela 5.21. Parâmetros de ensaios de soldagem para verificações relativas ao fator concentração de energia no processo PTA-P (valores medidos via SAP)

Keyhole			Keyhole + pó			Keyhole ++ pó		
Im ₁ * (A)	Um ₁ * (V)	Pm ₁ * (kW)	Im ₁ * (A)	Um ₁ * (V)	Pm ₁ * (kW)	Im ₁ * (A)	Um ₁ * (V)	Pm ₁ * (kW)
169,3	41,0	6,9	168,8	42,5	7,2	168,8	41,4	7,0
Vgpl (l/min)	Vmpo (g/min)		Vgpl (l/min)	Vmpo (g/min)		Vgpl (l/min)	Vmpo (g/min)	
3,4	-		3,4	16,2		3,4	32,4	
PTA-P								
Im ₁ * (A)	Um ₁ * (V)	Pm ₁ * (kW)						
169,0	42,5	7,2						
Vgpl (l/min)	Vmpo (g/min)							
2,0	32,4							
Vgprot (l/min)			Vga** (l/min)		Vs (cm/min)		DBP (mm)	
12,0 (Ar+10 % H ₂)			3,5 (Ar)		17,0		13,0	
Øc (mm)			Re (mm)		Øe (mm)		Posição	
3,2			3,1		4,0		plana	
* valores medidos								
**quando adicionado pó								
Obs.: As designações de cada solda são representativas (explicação no texto)								

Não houve alteração brusca da potência de soldagem. Em relação aos oscilogramas, apesar de todos terem sido acometidos por um ruído (que se mostrou, no entanto, sistemático), nota-se que para o primeiro teste, “Keyhole”, há relativamente alta oscilação (Figura 5.57). Pode ser um reflexo da instabilidade da poça, que pode ser também relacionada ao alto teor de porosidades no metal de solda (Figura 5.58). Nesta figura, se vê que o nível de porosidades caiu com a adição de pó, mas só foi eliminado com a redução da vazão de gás de plasma, corroborando informações de Deus [10].

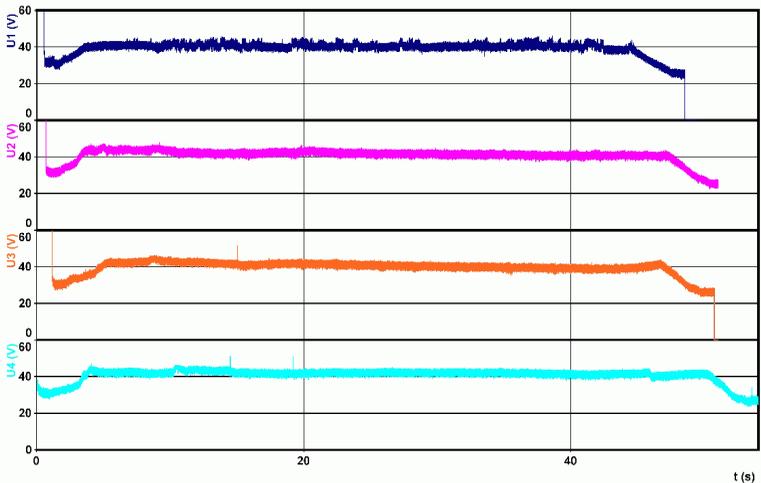


Figura 5.57. Oscilogramas relativos as soldas da Tabela 5.21 (U1: Keyhole; U2: Keyhole + pó; U3: Keyhole ++ pó; U4: PTA-P)

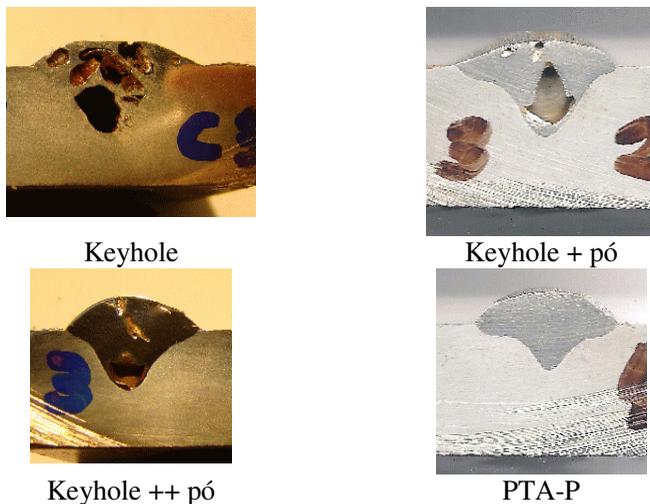


Figura 5.58. Seções transversais relativas às soldas descritas na Tabela 5.21

Na Figura 5.59 encontram-se os aspectos geométricos das soldas relativas à Tabela 5.21.

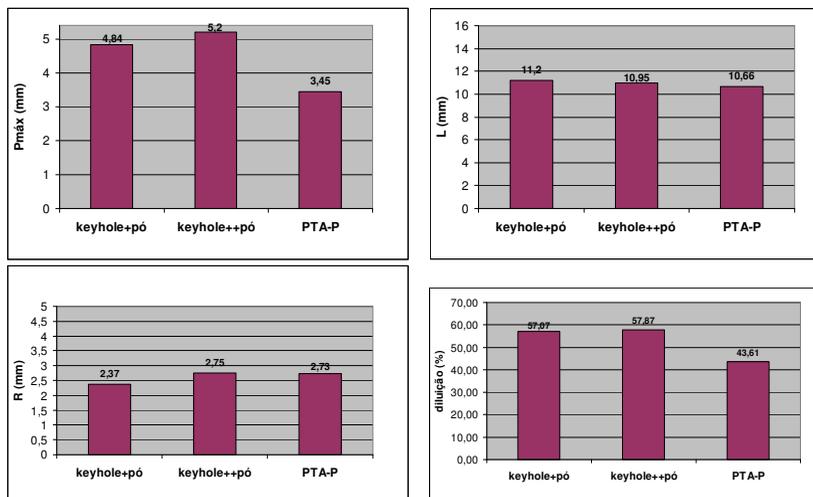


Figura 5.59. Geometria do cordão e diluição para as soldas da Tabela 5.21

A Figura 5.60 ilustra a massa do cordão depositado. Neste caso, o tempo de soldagem foi menor que um minuto, pois a velocidade de soldagem foi maior. Assim, a massa teórica alimentada para “Keyhole + pó” foi 10,5 g e para “Keyhole ++ pó” e “PTA-P”, 20,5 g.

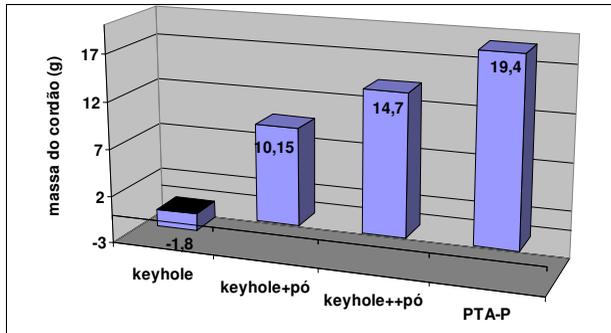


Figura 5.60. Massa dos cordões depositados, relativos à Tabela 5.21.

De fato, o aumento da vazão de gás de plasma aumenta a constrição do arco, como medido em [86] e simulado em [68] (e indicado também a maior $P_{máx}$, na Figura 5.59). Todavia, para a soldagem PTA-P, este aspecto deve ser levado em consideração por um ponto de vista criterioso, pois, como dito, em soldas de revestimento não há interesse em alta penetração e diluição. Além desse fato, nota-se que uma maior constrição, resultante de maior vazão de gás de plasma, não necessariamente resultou em maior taxa de deposição de material.

O diâmetro do orifício constritor, que estrangula geometricamente o arco, também teve seus efeitos investigados para a soldagem PTA-P. A Tabela 5.22 representa a bateria de ensaios realizada para este fim.

Tabela 5.22. Parâmetros de ensaios de soldagem para verificações relativas ao fator concentração de energia em PTA-P (variação do diâmetro do orifício constritor) (valores medidos via SAP)

Orifício 1			Orifício 2			Orifício 3		
Im ₁ * (A)	Um ₁ * (V)	Pm ₁ * (kW)	Im ₁ * (A)	Um ₁ * (V)	Pm ₁ * (kW)	Im ₁ * (A)	Um ₁ * (V)	Pm ₁ * (kW)
130,2	39,4	5,1	130,8	35,6	4,7	130,5	33,1	4,3
Øc (mm)		DBP (mm)	Øc (mm)		DBP (mm)	Øc (mm)		DBP (mm)
2,3		13,0	3,2		13,0	4,0		13,0
Vgprot (l/min)			Vgá** (l/min)		Vs (cm/min)		Vgpl (l/min)	
12,0 (Ar+10 % H ₂)			3,5 (Ar)		10,0		2,0	
Vm _{po} (g/min)			Re (mm)		Øe (mm)		Posição	
17,0			3,0		4,0		plana	
* valores medidos								

Na Figura 5.61, o gráfico mostra que há uma relação inversa entre o diâmetro do bico constritor e a tensão e potência médias de soldagem e na Figura 5.62, o gráfico mostra também leve queda na taxa de deposição. Ou seja, nota-se uma tendência a aumento da taxa de deposição com aumento da constricção pela redução do diâmetro do orifício constritor, ao contrário do que ocorreu para aumento da vazão do gás de plasma.

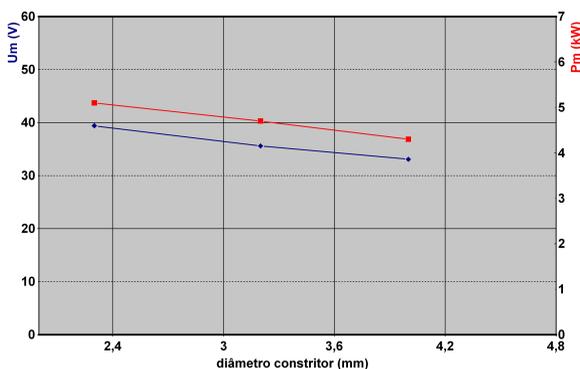


Figura 5.61. Comportamento da tensão média (Um) e potência média (Pm) de soldagem para os parâmetros da Tabela 5.22

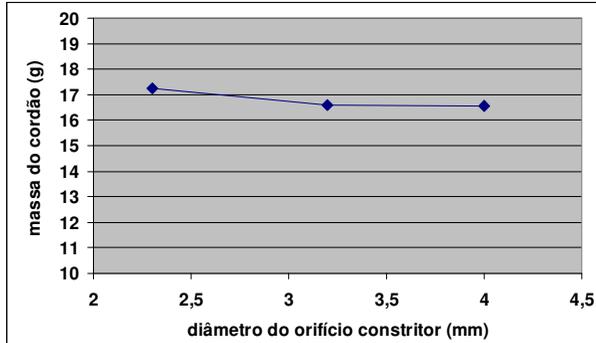


Figura 5.62. Massa dos cordões depositados em um minuto de solda, relativos à Tabela 5.22.

Por outro lado, nota-se na análise geométrica dos cordões (Figura 5.63) que o maior valor de P_m para o bico com diâmetro constritor de 2,3 mm resultou em considerável maior $P_{máx}$ e diluição, indesejáveis para soldagem de revestimento.

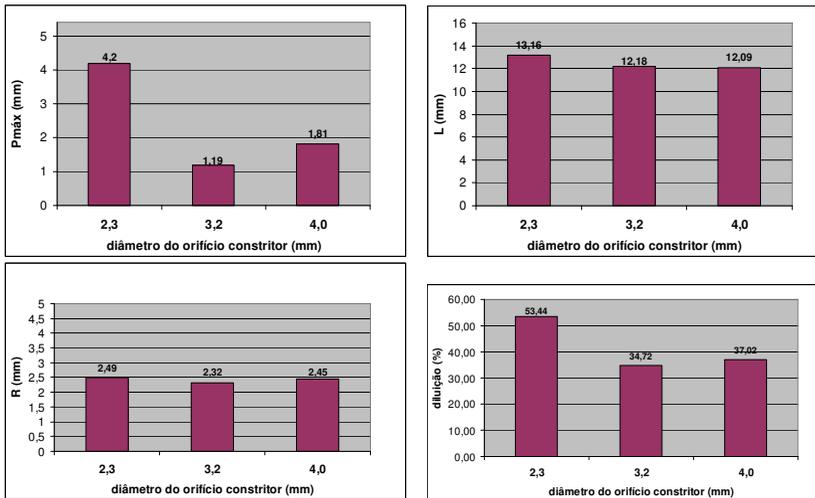


Figura 5.63. Geometria do cordão e diluição para as soldas da Tabela 5.22 (diferentes diâmetros do orifício constritor)

O efeito recuo do eletrodo foi, da mesma maneira, investigado no contexto da constrição do arco para a soldagem PTA-P. Foram testadas duas correntes diferentes conforme Tabela 5.23.

Tabela 5.23. Parâmetros de ensaios de soldagem para verificações relativas ao fator concentração de energia no processo PTA-P, com variação do recuo do eletrodo (valores medidos via SAP)

Recuo 1			Recuo 2			Recuo 3		
Im ₁ * (A)	Um ₁ * (V)	Pm ₁ * (kW)	Im ₁ * (A)	Um ₁ * (V)	Pm ₁ * (kW)	Im ₁ * (A)	Um ₁ * (V)	Pm ₁ * (kW)
112,8	28,9	3,3	112,3	31,6	3,6	112,3	32,6	3,7
Im ₂ * (A)	Um ₂ * (V)	Pm ₂ * (kW)	Im ₂ * (A)	Um ₂ * (V)	Pm ₂ * (kW)	Im ₂ * (A)	Um ₂ * (V)	Pm ₂ * (kW)
131,9	27,1	3,6	131,4	29,8	3,9	131,3	31,2	4,1
Re (mm)		DBP (mm)	Re (mm)		DBP (mm)	Re (mm)		DBP (mm)
1,5		13,0	2,5		13,0	3,5		13,0
Vgprot (l/min)			Vga** (l/min)			Vs (cm/min)		Vgpl (l/min)
12,0 (Ar+10 % H ₂)			3,5 (Ar)			10,0		2,0
Vmpo (g/min)			Øc (mm)			Øe (mm)		Posição
17,0			3,2			4,0		plana
* valores medidos								

Para ambas as correntes reguladas, revela-se uma relação direta da tensão e potência médias com o valor do recuo do eletrodo, melhor visualizada na Figura 5.64. O gráfico também mostra que as potências médias são maiores para maior corrente de soldagem, enquanto as tensões médias são menores para maior corrente, característica esta encontrada em determinadas regiões operacionais de processos a eletrodo permanente.

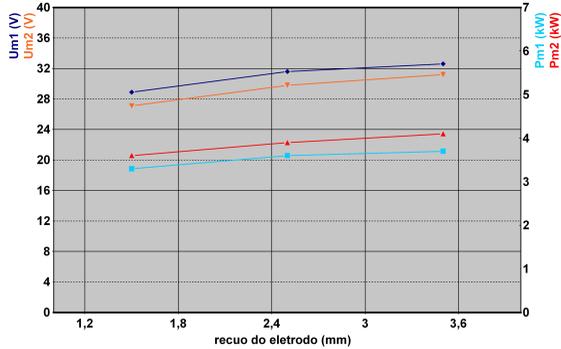


Figura 5.64. Comportamento da tensão média (U_m) e potência média (P_m) de soldagem para os parâmetros da Tabela 5.23, com variação do recuo do eletrodo para diferentes correntes de soldagem PTA-P

A Figura 5.65, na qual Im_1 representa a corrente do arco principal de aproximadamente 110 A e Im_2 , 130 A, traduz o comportamento da taxa de deposição face a alterações no recuo do eletrodo. Nota-se uma diferença nesta relação para as condições aplicadas. Para uma corrente de cerca de 110 A, a relação da taxa de deposição com o recuo do eletrodo parece ser direta, e inversa para uma corrente de cerca de 130 A (nas condições do ensaio). Pode-se supor que, para 110 A, o aumento da taxa de deposição seja uma consequência do aumento da potência de soldagem decorrente do aumento do recuo do eletrodo. Para o outro nível de corrente, levanta-se a hipótese de um perfil dinâmico do jato plasma que desviou certa quantidade de partículas do trajeto até a poça.

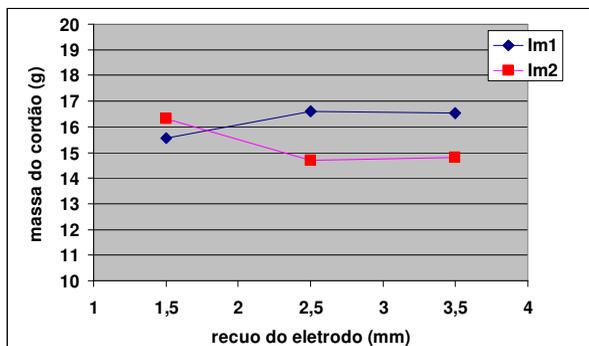


Figura 5.65. Massa dos cordões depositados em um minuto de solda, relativos à Tabela 5.23, com variação do recuo do eletrodo para diferentes correntes de soldagem ($I_{m1} \approx 110$ A; $I_{m2} \approx 130$ A)

Os resultados apresentados adiante, na Figura 5.66, expressam a dependência da geometria do cordão de solda da taxa de deposição, e ratificam o fato de que o efeito da constrição do arco deve ser analisado para o processo PTA-P de maneira distinta do processo Plasma. No caso do segundo, um aumento do recuo do eletrodo causaria aumento da $P_{máx}$ e redução da L . Para o PTA-P, a análise é mais complexa.

Em 110 A de corrente do arco principal, nota-se a princípio uma redução da $P_{máx}$, que provavelmente advém do aumento da taxa de deposição, que vence o efeito do aumento da constrição causada pelo aumento do recuo do eletrodo. O segundo incremento no recuo do eletrodo, de 2,5 mm para 3,5 mm, não acarreta em aumento da taxa de deposição. Ou seja, poder-se-ia imaginar que o efeito tradicionalmente esperado prevaleceria, causando maior $P_{máx}$. No entanto, não é o que ocorre. Levanta-se, portanto a hipótese de que de que um incremento adicional de 2,5 mm para 3,5 mm, não exerce mais o efeito de aumento da constrição, apenas afasta isoterma de maior temperatura da peça. Além disso, as temperaturas mais próximas à poça podem resultar em maior viscosidade do plasma, com menor velocidade do mesmo e conseqüente menor depressão da poça.

O comportamento em 130 A parece corroborar esta hipótese, com diferenças advindas do diferente comportamento da taxa de deposição. No primeiro incremento, a redução da taxa de deposição incorre em aumento da penetração ($P_{máx}$), que também poderia ser associada (como tradicionalmente o é para o processo Plasma) ao aumento da constrição. A redução da massa depositada associada ao aumento da potência

de soldagem pode ter sido a causa para aumento da temperatura da poça e sua fluidez, com conseqüente aumento de L e redução de R. O segundo incremento no recuo do eletrodo, por sua vez, resultou em queda da Pmáx (e da diluição), apesar de a taxa de deposição ter praticamente se mantido e do aumento da potência. Novamente, acredita-se que o efeito do aumento da constricção pelo aumento do recuo do eletrodo se “saturou” no salto de 1,5 mm para 2,5 mm, não ocorrendo mais para o segundo incremento. Este apenas acarretou em afastamento da poça de isoterma de maior temperatura.

Para uma corrente de 170 A, Diaz [9] obteve aumento de L e da taxa de deposição com um incremento no recuo do eletrodo.

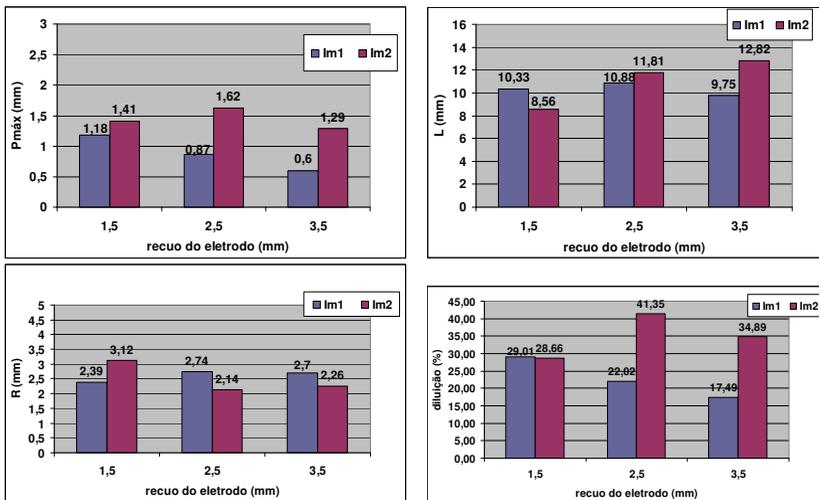


Figura 5.66. Geometria do cordão e diluição para as soldas da Tabela 5.23, com diferentes recuos do eletrodo ($Im1 \approx 110$ A; $Im2 \approx 130$ A)

5.7. Soldagem PTA-P em posições forçadas (fora da plana)

As aplicações vislumbradas do processo PTA-P englobam a necessidade de procedimentos para soldas em posições forçadas, além da posição plana. Embora o Capítulo 2 desta obra tenha mostrado trabalhos que abordaram este tema, as condições ora presentes se diferenciam das do presente trabalho. Schreiber [65, 93] se limitou a baixas correntes e baixas taxas de alimentação (com tetos respectivos de 90 A e 6,0 g/min) e materiais distintos, como ligas de Ni. Diaz [9] fez uso de uma tocha automática, com princípios construtivos distintos dos da utilizada no presente trabalho. Nenhum deles realizou testes na posição sobrecabeça, a 6 horas, ou comparou o desempenho dos modos pulsado e constante; com tecimento e sem tecimento.

Preliminarmente, se observou que com o posicionamento da tocha para soldagem sobrecabeça a 45° (Figura 5.67) houve pulsação do material injetado. Em vista disso, aumentou-se a vazão do gás de arraste para 5,0 l/min, o que restituiu a regularidade do fluxo. Este valor foi, portanto, adotado também para os ensaios posteriores em posições forçadas.

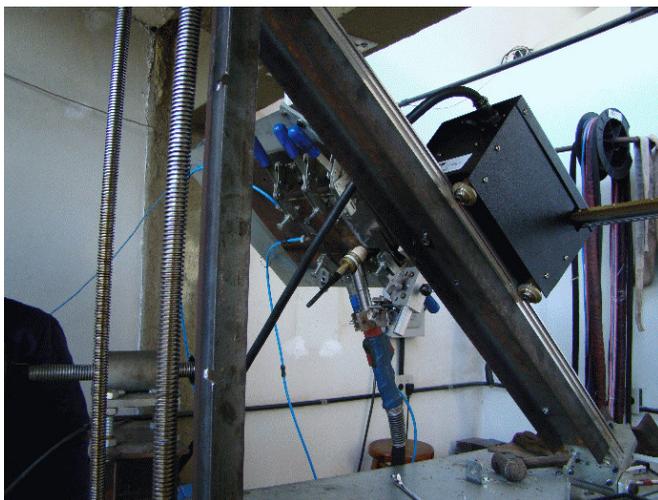


Figura 5.67. Bancada de soldagem preparada para ensaios de soldagem sobrecabeça a 45° (em relação à normal à posição plana)

As Figuras de 5.68 a 5.70 adiante mostram que há diferentes padrões de injeção do pó, resultantes das condições de arraste e geometria interna da tocha para cada diferente posição. A 45° em relação à normal à posição plana (Figura 5.68) se nota injeção preferencial pelos três furos anteriores do bico constritor, a 90° (6 horas, Figura 5.69) o jato atravessa preferencialmente o orifício anterior e a 0° (posição de soldagem vertical, Figura 5.70), o orifício inferior (como já havia sido visto observado no item 5.1. Estes resultados foram obtidos com uma taxa de alimentação de $17,4 \text{ g/min}$ e material 316 L.

A análise da trajetória das partículas mostra que o ponto focal do pó permanece praticamente imutável e se mantém similar ao ponto focal geométrico dos canais injetores (vide Figura 5.32). Esta característica foi considerada suficiente para obtenção de soldas satisfatórias e prosseguimento dos trabalhos. Apesar disso, considera-se a verificação futura do funcionamento de uma tocha como a descrita em [65], com alimentações separadas e independentes para os orifícios inferiores e superiores.

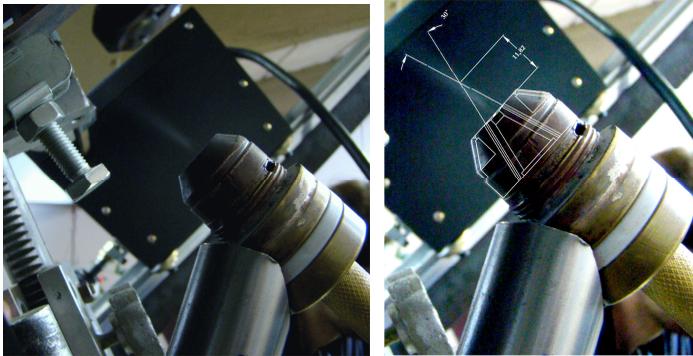


Figura 5.68. Comportamento da injeção de pó a 45° (sobrecabeça) (sob as condições presentes no presente trabalho)

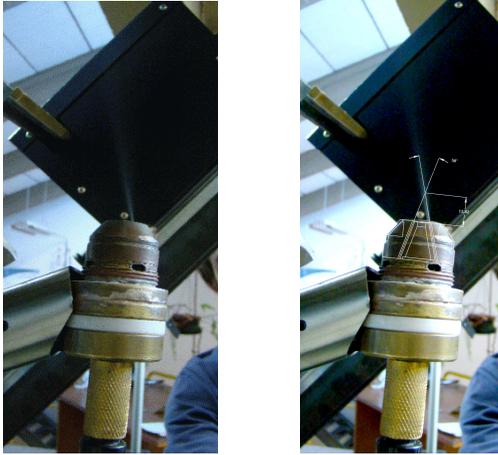


Figura 5.69. Comportamento da injeção de pó a 90° (sobrecabeça) (sob as condições presentes no presente trabalho)



Figura 5.70. Comportamento da injeção de pó a 0° (vertical / horizontal) (sob as condições presentes no presente trabalho)

A partir destes resultados, se partiu para os ensaios de soldagem. Com o objetivo de se averiguar o potencial das técnicas de tecimento e pulsação de corrente em melhorar a estabilidade da poça de soldagem (pela redução da tendência a escorrimento) e, assim, prover o processo de maior robustez, foram realizadas soldas nas posições forçadas acima mencionadas. Quanto à posição vertical, ensaios preliminares mostraram

maior facilidade (pode ser considerado um fator de robustez) para o sentido descendente, o qual, por conseguinte, foi adotado. Resultados de [93] corroboram esta decisão.

A Tabela 5.24 descreve os testes na posição sobrecabeça, a 45° e sentido descendente, ao passo que a Figura 5.67 mostra a bancada preparada para esta posição. Uma primeira tentativa com manutenção do gás de proteção em 12 l/min levou ao surgimento de poros no início da solda. O aumento desse valor para 16,0 l/min sanou o problema.

Tabela 5.24. Parâmetros de soldagem PTA-P testados para a posição sobrecabeça a 45° no sentido descendente (parâmetros elétricos medidos via SAP)

Constante			Pulsado			Tecimento		
Im ₁ * (A)	Um ₁ * (V)	Pm ₁ * (kW)	Im* (A)	Um* (V)	Pm* (kW)	Im* (A)	Um* (V)	Pm* (kW)
130,4	27	3,5	131,1	27	3,6	130,2	27,5	3,6
			Ip* (A)	Ib* (A)		A (mm)	f (Hz)	
			170,0	90,0		12,0	0,7	
			tp (s)	tb (s)				
			0,7	0,7				
Vgpl (l/min)		Vgprot (l/min)	Vga (l/min)		Vs (cm/min)		Vm _{po} (g/min)	
2,0 (Ar)		16,0 (Ar)	5,0 (Ar)		10,0		16,8	
Øc (mm)		Re (mm)	Øe (mm)		DBP (mm)			
4,0		3,5	4,0		13,0			
* valores medidos								

A soldagem com tecimento se deixou realizar sem problemas de escorrimento. Por outro lado, os outros modos não permitiram resultados satisfatórios. A corrente pulsada, embora não tenha apresentado escorrimento, originou uma poça instável, correndo à frente do arco e em aparente iminência de escorrer. A corrente constante sem tecimento escorreu (Figura 5.71).

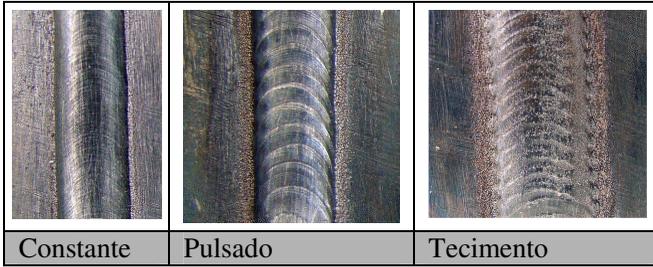


Figura 5.71. Aspectos superficiais das soldas relativas à Tabela 5.24, posição sobrecabeça a 45°, sentido descendente

Os procedimentos da Tabela 5.24 foram aplicados à soldagem vertical descendente, cuja montagem da bancada se vê na Figura 5.72, resultando em escorrimento para soldagem sem tecimento em corrente constante e em corrente pulsada, como mostra a Figura 5.73. A Tabela 5.25 mostra os dados de soldagem aqusitados.

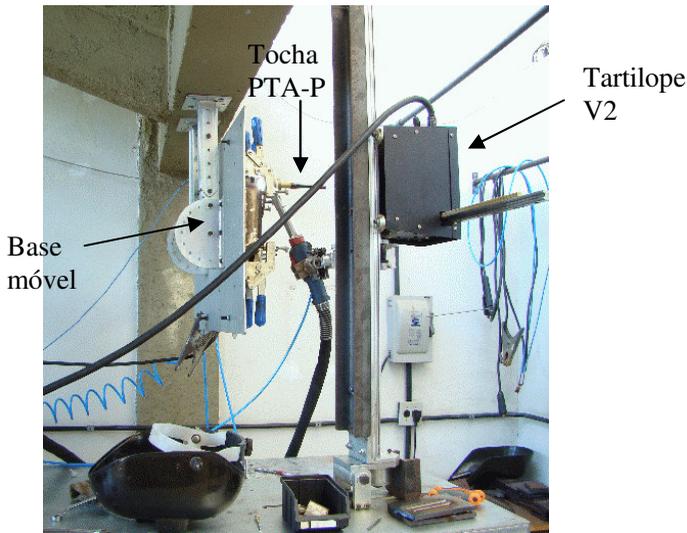


Figura 5.72. Montagem da bancada para soldagem vertical descendente

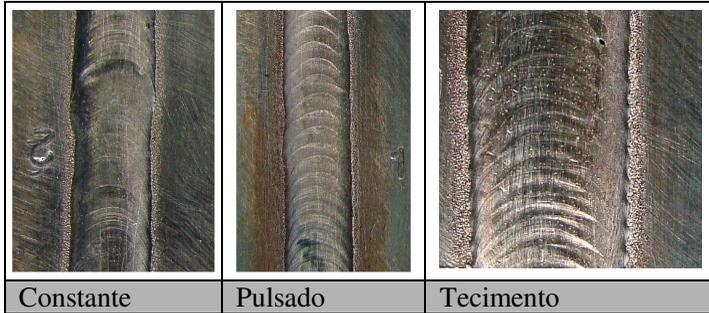


Figura 5.73. Aspectos superficiais das soldas relativas à Tabela 5.25, posição vertical descendente

Tabela 5.25. Parâmetros de soldagem PTA-P testados para a posição vertical descendente (parâmetros elétricos medidos via SAP)

Constante			Pulsado			Tecimento		
Im_1^* (A)	Um_1^* (V)	Pm_1^* (kW)	Im^* (A)	Um^* (V)	Pm^* (kW)	Im^* (A)	Um^* (V)	Pm^* (kW)
130,5	26,2	3,4	130,9	26,6	3,6	130,2	28,9	3,8

A Figura 5.74 ilustra o fato de que o escorrimento acontece periodicamente, em forma de pingos que alteram pontualmente a geometria do cordão, e pode ser detectado no oscilograma de tensão de soldagem, pois há, momentaneamente, alteração no comprimento do arco. Este comportamento pode ser utilizado em sistemas de controle da qualidade pela monitoração do processo em tempo real.

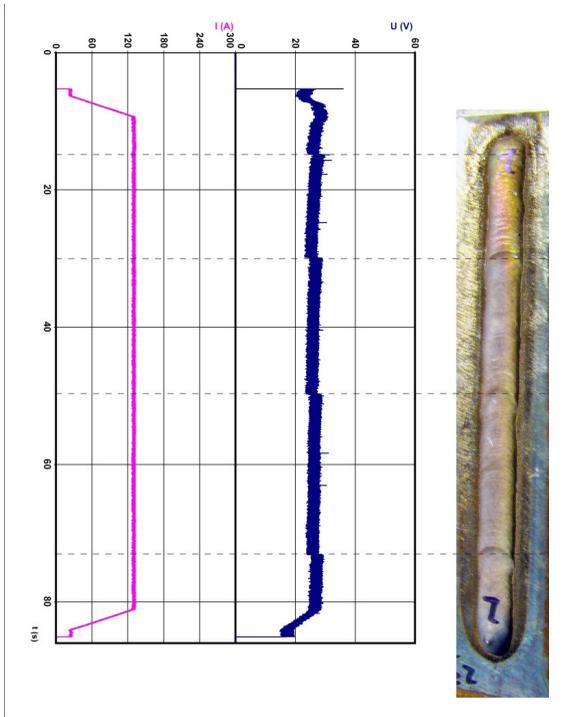


Figura 5.74. Comportamento da tensão de soldagem nos momentos em que há escorrimento da poça (pingos)

Houve um pingo logo no início da solda, observável em vídeo e no oscilograma, mas não no cordão. (Nesta representação o início do cordão se encontra deslocado em relação ao início do oscilograma devido ao tempo de rampa de corrente, durante o qual a tocha está parada.)

Neste ponto, se atentou para o fato de que os procedimentos englobavam um tempo de rampa de subida de corrente (3,0 s) e um tempo de atraso do início de movimentação da tocha (3,5 s) (reguláveis na tela do software de controle, vista na Figura 4.5). Em soldas na posição plana, esta estratégia é utilizada para estabilizar a poça no início da soldagem. No caso de soldagem em posições forçadas, entretanto, poderia causar instabilidade inicial que se alastraria por toda a duração da solda.

Com isto em mente, o tempo de rampa de subida de corrente foi reduzido para 2,0 s e o atraso do início de movimentação da tocha, para 1,5 s após a abertura do arco principal. De fato, não houve escorrimento

para o modo pulsado, tampouco para o modo constante, que é mostrado na Figura 5.75. (Os dados de aquisição se encontram na Tabela 5.26)

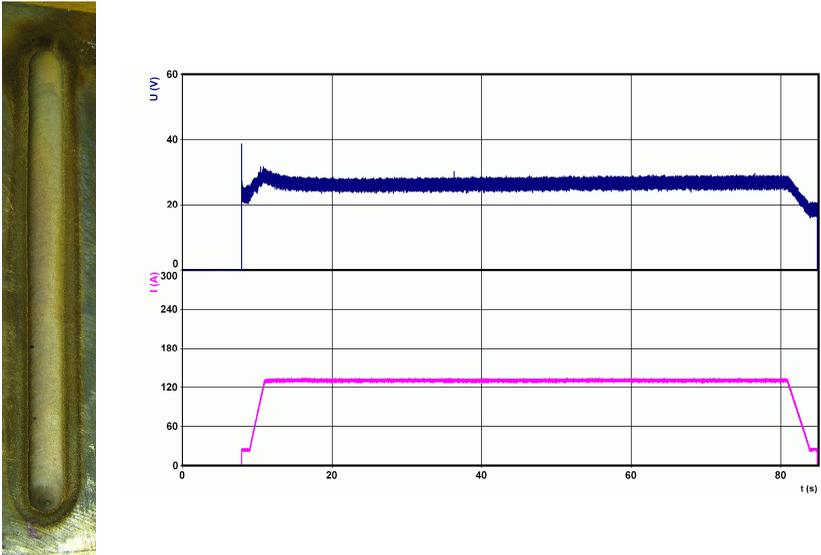


Figura 5.75. Solda na posição vertical descendente com parâmetros de início de soldagem modificados e ausência de escorrimento

Tabela 5.26. Parâmetros de soldagem PTA-P testados para a posição vertical descendente e parâmetros de início de soldagem modificados (parâmetros elétricos medidos via SAP)

Constante			Pulsado		
Im_1^* (A)	Um_1^* (V)	Pm_1^* (kW)	Im^* (A)	Um^* (V)	Pm^* (kW)
130,6	26,6	3,5	131, 3	27,2	3,7

Os ensaios incluíram, então, distintos valores de velocidades de soldagem, a fim de se determinar o limite operacional mínimo para as condições de soldagem presentes, tendo como critério o escorrimento. Schreiber [93] aborda a influência da velocidade de soldagem em soldas verticais, no sentido descendente, e conclui que apenas soldas mais ve-

lozes (em relação a soldas na posição plana) viabilizam resultados satisfatórios, evitando escorrimento.

À velocidade de soldagem de 7,0 cm/min se obtiveram resultados satisfatórios para os três modos de soldagem diferentes (mesmas regulagens anteriores), cujos dados monitorados se encontram na Tabela 5.27. As soldas podem ser vistas na Figura 5.76.

Tabela 5.27. Parâmetros de soldagem PTA-P testados para a posição vertical descendente e parâmetros de início de soldagem modificados; velocidade de soldagem de 7,0 cm/min (parâmetros elétricos medidos via SAP)

Constante			Pulsado			Tecimento		
Im ₁ * (A)	Um ₁ * (V)	Pm ₁ * (kW)	Im* (A)	Um* (V)	Pm* (kW)	Im* (A)	Um* (V)	Pm* (kW)
130,7	26,5	3,5	131,8	26,3	3,6	130,6	27,3	3,6

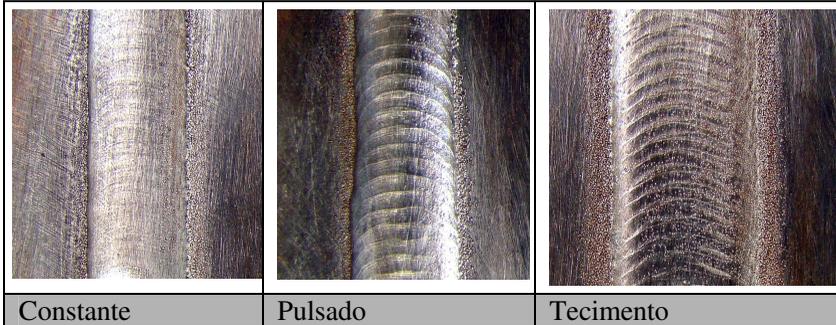


Figura 5.76. Soldas na posição vertical descendente com parâmetros de início de soldagem modificados e ausência de escorrimento, velocidade de 7,0 cm/min

Todavia, em 5,0 cm/min (Tabela 5.28), novamente apenas o modo com tecimento possibilitou uma solda sem escorrimento, como se vê na Figura 5.77.

Tabela 5.28. Parâmetros de soldagem PTA-P testados para a posição vertical descendente e parâmetros de início de soldagem modificados; velocidade de soldagem de 5,0 cm/min (parâmetros elétricos medidos via SAP)

Constante			Pulsado			Tecimento		
Im_1^* (A)	Um_1^* (V)	Pm_1^* (kW)	Im^* (A)	Um^* (V)	Pm^* (kW)	Im^* (A)	Um^* (V)	Pm^* (kW)
130,6	25,8	3,4	131,8	26,2	3,5	130,7	26,7	3,5

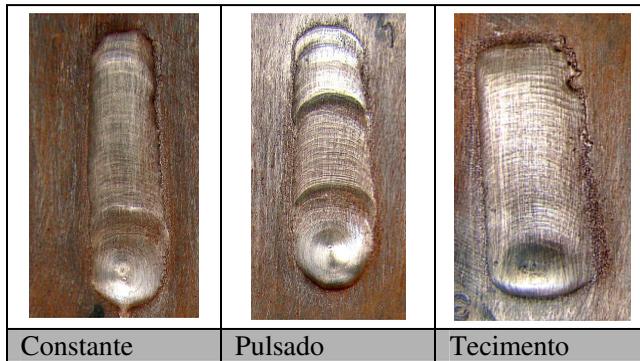


Figura 5.77. Soldas na posição vertical descendente com parâmetros de início de soldagem modificados com escorrimento para os modos sem tecimento, velocidade de 5,0 cm/min

Nota-se, pelos valores médios de potência, que esta não é a responsável pela tendência ou não ao escorrimento, pois permanece praticamente a mesma. Esta tendência pode ser atribuída à forma geométrica do banho líquido, que, quanto mais espalhado (mais largo e menos alto), aumenta a área de atuação da força Peso. Além disso, pode ser aventado que o melhor ângulo de molhamento melhore o ancoramento da poça sobre a peça, assim como resfriamento mais rápido resulte em maior tensão superficial.

Uma tentativa preliminar de se reduzir a razão I_p/I_b (140 A / 120 A), mantendo-se a corrente média e outros parâmetros fixos não trouxe melhorias. Caberia, em trabalhos futuros, maior faixa de variação e tam-

bém consideração da pulsação sincronizada de pó, para geração de conhecimento mais aprofundado sobre a soldagem pulsada em posições forçadas.

Restava a verificação na soldagem sobrecabeça a 90° em relação à normal à peça (6 horas). Um procedimento que obtivesse sucesso também nesta posição, além da vertical descendente, tornaria possível, por exemplo, a definição de um procedimento para soldagem semi-orbital. Foi escolhida a velocidade de 10,0 cm/min, a mais alta testada. A Tabela 5.29 mostra os parâmetros medidos e a Figura 5.78 a montagem para o experimento, enquanto a Figura 5.79 mostra os resultados, satisfatórios.

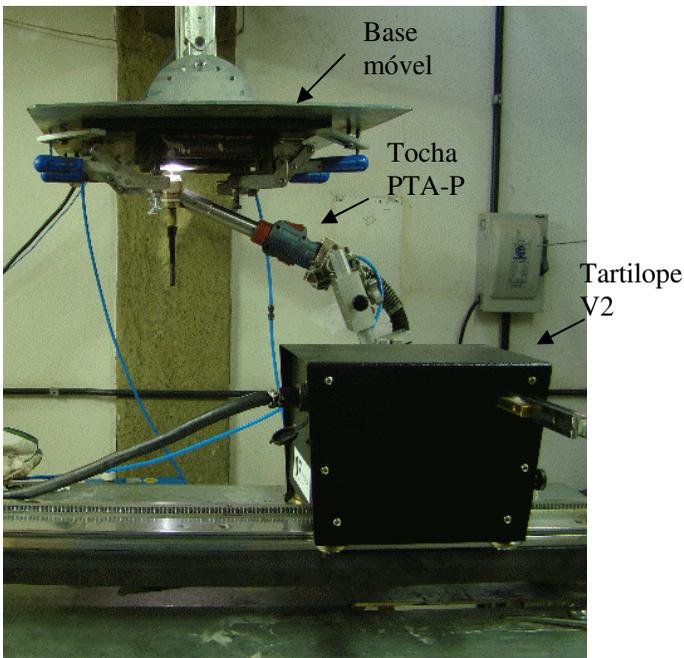


Figura 5.78. Montagem da bancada para soldagem sobrecabeça a 90° em relação à normal à peça (6 horas)

Tabela 5.29. Parâmetros de soldagem PTA-P testados para a posição sobrecabeça a 90° em relação à normal à peça (6 horas) e parâmetros de início de soldagem modificados; velocidade de soldagem de 10,0 cm/min (parâmetros elétricos medidos via SAP)

Constante			Pulsado			Tecimento		
Im [*] (A)	Um [*] (V)	Pm [*] (kW)	Im [*] (A)	Um [*] (V)	Pm [*] (kW)	Im [*] (A)	Um [*] (V)	Pm [*] (kW)
130,6	27,3	3,6	131,8	26,3	3,6	130,7	26,5	3,6

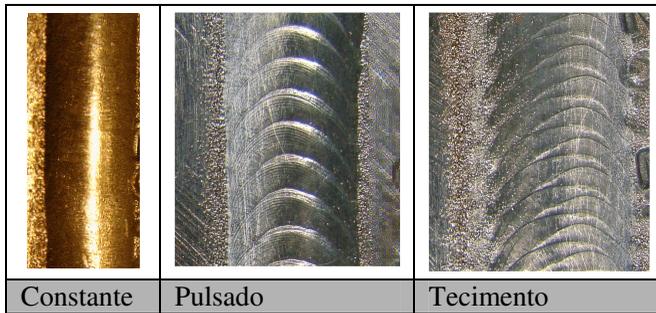


Figura 5.79. Soldas na posição sobrecabeça a 90° em relação à normal à peça (6 horas) e parâmetros de início de soldagem modificados; velocidade de soldagem de 10,0 cm/min

As características geométricas resultantes, tomadas dos procedimentos com tecimento a 10 cm/min, podem ser vistas na Figura 5.80. Estudos aprofundados acerca da taxa de deposição, geometria do cordão e diluição e suas relações com as potências de soldagem resultantes em posições forçadas fugiram ao escopo do presente trabalho, que visou a viabilização e verificação de condições de factibilidade em posições forçadas. Pôde-se observar, no entanto, que os resultados acenam para maior taxa de deposição para sobrecabeça a 45° e vertical descendente do que para sobrecabeça a 90° (6 horas).

Pode-se concluir que a utilização de tecimento em soldagem em posições forçadas é recomendada, pois torna o processo mais robusto, estendendo a faixa de velocidades. Deve-se, no entanto, para cada aplicação, levar em consideração os resultados apresentados no item 5.5.2. Outrossim, os tempos e rampas de início de soldagem devem ser regulados de maneira que não ocorra instabilidade da poça.

Já em relação à facilidade de soldagem manual em posições forçadas, o soldador relatou maior facilidade sem pulsação de corrente, com tecimento.

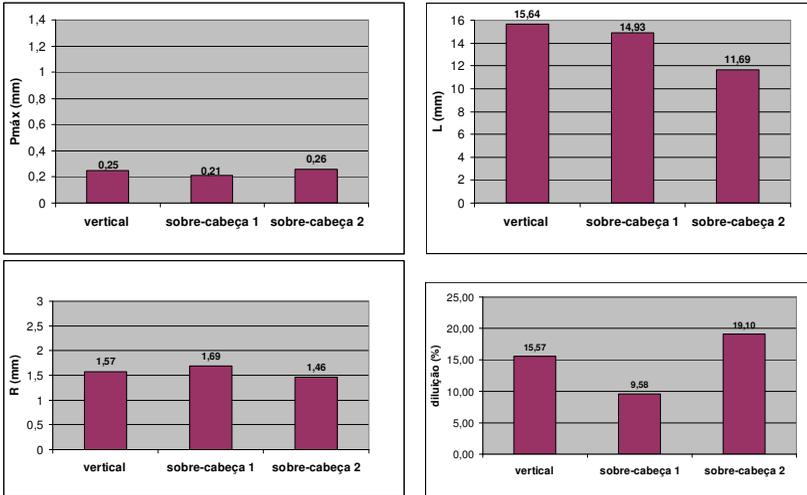


Figura 5.80. Aspectos geométricos das soldas nas posições vertical descendente, sobre-cabeça a 45° (sobre-cabeça 1) e sobre-cabeça a 90° (6 horas) (sobre-cabeça 2)

5.8. PTA-P Combinado - Arco não Transferido em Alta Corrente

A manipulação do arco piloto no PTA-P, em termos de potência, foi abordada em alguns trabalhos (vide item 2.7) com o objetivo de se obter um balanceamento otimizado entre duas características fundamentais de revestimentos soldados, quais sejam, taxa de deposição de material de aporte e diluição. Uma vez que o acabamento superficial satisfatório também seja garantido, esta flexibilidade traz maior produtividade (pela possibilidade de menor número de passes de solda) e maior resistência do cordão (pela manutenção da composição química do revestimento próxima daquela do material depositado, que possui de fato propriedades resistentes a determinados tipos de desgaste).

A idéia, portanto, é reduzir a corrente do arco principal e, com isso, a taxa de fusão do substrato e aumentar a corrente do arco piloto e,

com isso, a quantidade de material de aporte fundido, materializando um mix entre soldagem e aspersão térmica (analogia também já feita em [86]).

Manteve-se um valor de corrente do arco principal necessário à obtenção de fusão do material de base. A partir dessa premissa, se variaram a corrente do arco piloto, corrente do arco principal e a taxa de alimentação de pó.

A Tabela 5.30 descreve a primeira bateria de ensaios. Note-se que o diâmetro do bico constritor, assim como o recuo do eletrodo, foram reduzidos, numa tentativa de tornar o efeito do arco piloto ainda mais pronunciado. Considerou-se que nesta configuração maior parte do plasma do arco piloto estaria no exterior da tocha, mais próxima ao pó injetado.

Tabela 5.30. Parâmetros de soldagem PTA-P para verificação da influência da intensidade de corrente do arco piloto sobre as características da solda. Variação de regulagem apenas da corrente do arco piloto ($I_{m_{ap}}$) ($I_{m_{ap}} \approx 70$ A, $V_{mpo} = 9,8$ g/min) (parâmetros elétricos medidos via SAP)

$I_{m_{ap1}}$	$I_{m_{ap}}^*$ (A)	$U_{m_{ap}}^*$ (V)	$P_{m_{ap}}^*$ (kW)	
	22,6	15,7	0,4	
	I_m^* (A)	U_m^* (V)	P_m^* (kW)	
	72,7	28,2	2,1	
$I_{m_{ap2}}$	$I_{m_{ap}}^*$ (A)	$U_{m_{ap}}^*$ (V)	$P_{m_{ap}}^*$ (kW)	
	61,5	18	1,1	
	I_m^* (A)	U_m^* (V)	P_m^* (kW)	
	72,8	28,7	2,1	
$I_{m_{ap3}}$	$I_{m_{ap}}^*$ (A)	$U_{m_{ap}}^*$ (V)	$P_{m_{ap}}^*$ (kW)	
	118,7	20,8	2,5	
	I_m^* (A)	U_m^* (V)	P_m^* (kW)	
	72,6	29,6	2,1	
V_{gpl} (Ar)	V_{gprot} (Ar)	V_{ga} (Ar)	V_s	V_{mpo}
(l/min)	(l/min)	(l/min)	(cm/min)	(g/min)
2,0	12,0	3,5	10,0	9,8
$\varnothing c$ (mm)	Re (mm)	$\varnothing e$ (mm)	DBP (mm)	Posição
3,2	1,5	4,0	13,0	plana
* valores medidos				

Observou-se que há variação dos parâmetros do arco principal causadas por variações do arco piloto, cuja relação pode ser visualizada na Figura 5.81. Apesar de a tensão média ter apresentado uma tendência crescente, a potência média se mostrou constante para a faixa em consideração.

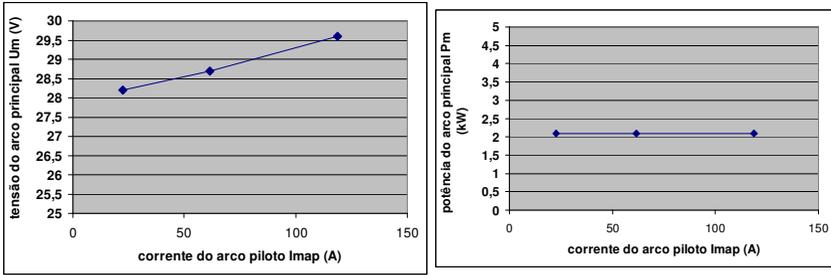


Figura 5.81. Variação da tensão e potência médias do arco principal em consequência da variação na corrente do arco piloto, conforme Tabela 5.30

A Figura 5.82 ilustra pequeno aumento na massa depositada e, então, queda apreciável deste valor para incrementos subsequentes da corrente do arco piloto, configurando um resultado não condizente com o esperado.

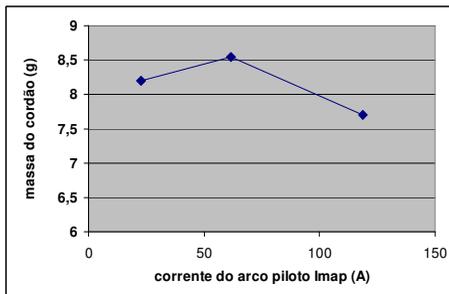


Figura 5.82. Massa do cordão depositado em 1 minuto de soldagem, sob diferentes correntes do arco piloto e corrente do arco principal fixa (parâmetros de soldagem da Tabela 5.30)

Ao se analisarem os aspectos geométricos do cordão de solda (Figura 5.83), se nota que a corrente de aproximadamente 120 A no arco

piloto causa variações apreciáveis. Os maiores valores de L e diluição podem ser atribuídos à associação dos efeitos da menor taxa de deposição (e conseqüente menor R), assim como da maior potência do arco piloto. Pode se somar também o fato de que as isotermas de maior temperatura do plasma do arco piloto ficam mais próximas à superfície da peça. A menor $P_{m\acute{a}x}$ da I_{map2} pode ser atribuída à sua maior taxa de deposição.

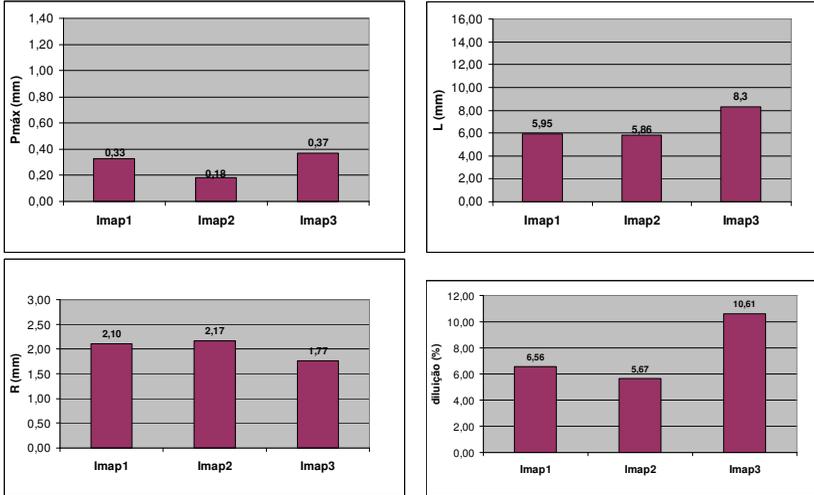


Figura 5.83. Aspectos geométricos das soldas sob diferentes correntes do arco piloto conforme Tabela 5.30

Para uma corrente do arco principal de aproximadamente 110 A, foram testadas três taxas de alimentação diferentes e distintos valores de corrente do arco piloto, para uma maior abrangência do mapeamento. Primeiramente foram alimentados 16,5 g/min, como mostra a Tabela 5.31.

Novamente, se percebe maior variação da tensão média em relação à da potência média, conseqüente do aumento da corrente do arco piloto (Figura 5.84).

Tabela 5.31. Parâmetros de soldagem PTA-P para verificação da influência da intensidade de corrente do arco piloto sobre as características da solda. Variação de regulagem apenas da corrente do arco piloto ($I_{m_{ap}}$) ($I_{m_{ap}} \approx 110$ A, $V_{mpo} = 16,5$ g/min) (parâmetros elétricos medidos via SAP)

$I_{m_{ap1}}$	$I_{m_{ap}}^*$ (A)	$U_{m_{ap}}^*$ (V)	$P_{m_{ap}}^*$ (kW)	
	29,0	16,3	0,5	
	$I_{m_{ap}}^*$ (A)	$U_{m_{ap}}^*$ (V)	$P_{m_{ap}}^*$ (kW)	
	112,6	24,8	2,8	
$I_{m_{ap2}}$	$I_{m_{ap}}^*$ (A)	$U_{m_{ap}}^*$ (V)	$P_{m_{ap}}^*$ (kW)	
	59,1	18,9	1,1	
	$I_{m_{ap}}^*$ (A)	$U_{m_{ap}}^*$ (V)	$P_{m_{ap}}^*$ (kW)	
	112,2	26,8	3,0	
$I_{m_{ap3}}$	$I_{m_{ap}}^*$ (A)	$U_{m_{ap}}^*$ (V)	$P_{m_{ap}}^*$ (kW)	
	98,8	21,1	2,1	
	$I_{m_{ap}}^*$ (A)	$U_{m_{ap}}^*$ (V)	$P_{m_{ap}}^*$ (kW)	
	112,0	27,5	3,1	
V_{gpl} (Ar)	V_{gprot} (Ar)	V_{ga} (Ar)	V_s	V_{mpo}
(l/min)	(l/min)	(l/min)	(cm/min)	(g/min)
2,0	12,0	3,5	10,0	16,5
$\varnothing c$ (mm)	Re (mm)	$\varnothing e$ (mm)	DBP (mm)	Posição
3,2	1,5	4,0	10,0	plana
* valores medidos				

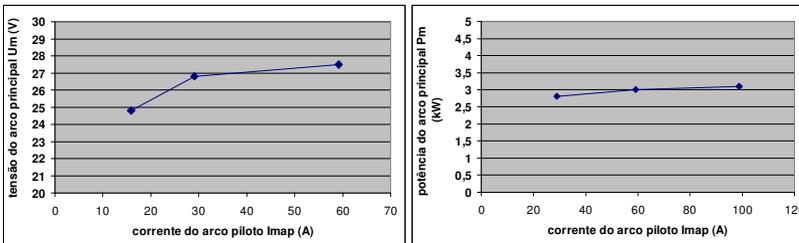


Figura 5.84. Variação da tensão e potência médias do arco principal em consequência da variação na corrente do arco piloto, conforme Tabela 5.31

Da Figura 5.85 pode-se concluir que neste caso, o aumento da corrente do arco piloto não causa variação apreciável na taxa de deposição, para mesma taxa de alimentação.

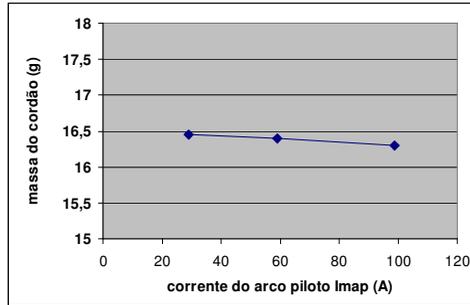


Figura 5.85. Massa do cordão depositado em 1 minuto de soldagem, sob diferentes correntes do arco piloto e corrente do arco principal fixa (parâmetros de soldagem da Tabela 5.31)

A Figura 5.86 traduz um comportamento em certo grau fora do esperado, com acentuado menor valor de diluição para maiores correntes do arco piloto. Como a taxa de deposição se manteve praticamente constante, se conjectura que os perfis de temperatura, viscosidade e velocidade do plasma exerceram a influência mais forte sobre a $P_{máx}$ e diluição, para esta configuração.

Ainda para uma corrente do arco principal de aproximadamente 110 A, foram alimentados 22,0 g/min, e os dados dos ensaios se encontram na Tabela 5.32. Neste caso, se percebe a alta capacidade de refrigeração do bico da tocha, que suportou o aquecimento anódico de uma corrente de cerca de 140 A do arco piloto.

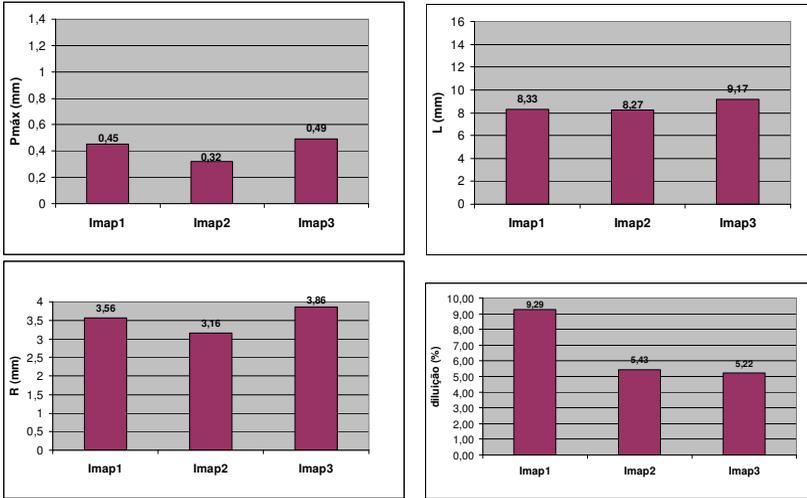


Figura 5.86. Aspectos geométricos das soldas sob diferentes correntes do arco piloto conforme Tabela 5.31

A maior variação da tensão média em relação à da potência média, conseqüente do aumento da corrente do arco piloto (Figura 5.87), se faz mais uma vez presente. Todavia, surge uma queda de U_m para $I_{m_{ap}} = 140$ A. Presume-se que um aumento na corrente do arco piloto resulte em uma maior necessidade de emissão catódica para fornecer elétrons ao plasma misto (plasma formado pelos dois arcos) e assim, se eleve a tensão do arco principal. No entanto, quando a corrente do arco piloto ultrapassa certo limite pode se alcançar uma situação de aquecimento do cátodo que fomenta a emissão eletrônica por outro mecanismo, ou ocorra maior grau de ionização na região do plasma, resultando em tendência à restituição da tensão do arco principal.

Neste contexto, coube a verificação do comportamento da tensão do arco piloto em ausência e presença do arco principal, plotado na Figura 5.88. Vê-se que, na ausência do arco principal, a tensão para correntes baixas apresenta ainda o final do conhecido comportamento presente em processos a eletrodo permanente, antes de entrar numa relação direta tensão / corrente. Na presença do arco principal, esta região não mais se apresenta.

Tabela 5.32. Parâmetros de soldagem PTA-P para verificação da influência da intensidade de corrente do arco piloto sobre as características da solda. Variação de regulagem apenas da corrente do arco piloto ($I_{m_{ap}}$) ($I_{m_{ap}} \approx 110$ A, $V_{m_{po}} = 22,0$ g/min) (parâmetros elétricos medidos via SAP)

$I_{m_{ap1}}$	$I_{m_{ap}}^*$ (A)	$U_{m_{ap}}^*$ (V)	$P_{m_{ap}}^*$ (kW)	
	20,3	16,4	0,3	
	$I_{m_{ap}}^*$ (A)	$U_{m_{ap}}^*$ (V)	$P_{m_{ap}}^*$ (kW)	
	112,0	27,3	3,1	
$I_{m_{ap2}}$	$I_{m_{ap}}^*$ (A)	$U_{m_{ap}}^*$ (V)	$P_{m_{ap}}^*$ (kW)	
	42,8	17,7	0,8	
	$I_{m_{ap}}^*$ (A)	$U_{m_{ap}}^*$ (V)	$P_{m_{ap}}^*$ (kW)	
	111,7	27,9	3,1	
$I_{m_{ap3}}$	$I_{m_{ap}}^*$ (A)	$U_{m_{ap}}^*$ (V)	$P_{m_{ap}}^*$ (kW)	
	64,1	18,8	1,2	
	$I_{m_{ap}}^*$ (A)	$U_{m_{ap}}^*$ (V)	$P_{m_{ap}}^*$ (kW)	
	111,5	29,3	3,3	
$I_{m_{ap4}}$	$I_{m_{ap}}^*$ (A)	$U_{m_{ap}}^*$ (V)	$P_{m_{ap}}^*$ (kW)	
	81,5	19,9	1,6	
	$I_{m_{ap}}^*$ (A)	$U_{m_{ap}}^*$ (V)	$P_{m_{ap}}^*$ (kW)	
	111,7	28,7	3,2	
$I_{m_{ap5}}$	$I_{m_{ap}}^*$ (A)	$U_{m_{ap}}^*$ (V)	$P_{m_{ap}}^*$ (kW)	
	101,1	21,5	2,2	
	$I_{m_{ap}}^*$ (A)	$U_{m_{ap}}^*$ (V)	$P_{m_{ap}}^*$ (kW)	
	111,5	29,9	3,3	
$I_{m_{ap6}}$	$I_{m_{ap}}^*$ (A)	$U_{m_{ap}}^*$ (V)	$P_{m_{ap}}^*$ (kW)	
	141,3	23,2	3,3	
	$I_{m_{ap}}^*$ (A)	$U_{m_{ap}}^*$ (V)	$P_{m_{ap}}^*$ (kW)	
	111,7	28,7	3,2	
Vgpl (Ar) (l/min)	Vgprot (Ar) (l/min)	Vga (Ar) (l/min)	Vs (cm/min)	Vmpo (g/min)
2,0	12,0	3,5	10,0	22,0
Øc (mm)	Re (mm)	Øe (mm)	DBP (mm)	Posição
3,2	1,5	4,0	13,0	plana
* valores medidos				

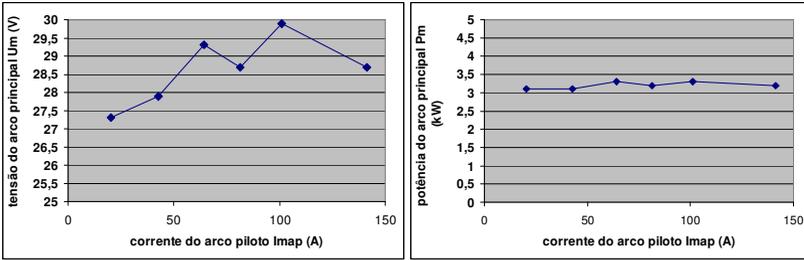


Figura 5.87. Variação da tensão e potência médias do arco principal em consequência da variação na corrente do arco piloto, conforme Tabela 5.32

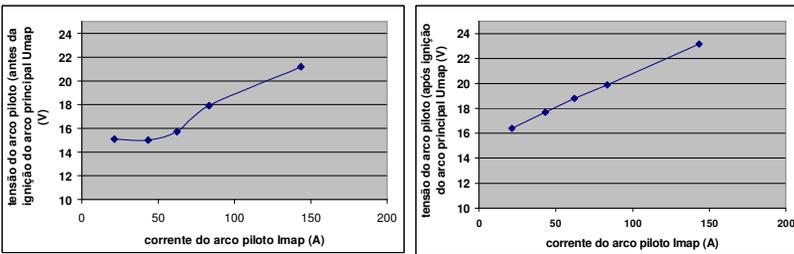


Figura 5.88. Comportamento da tensão do arco piloto, com variação em sua corrente, na ausência e na presença do arco principal (parâmetros de soldagem da Tabela 5.32)

No que concerne à taxa de deposição, apesar de seu valor para $I_{map} = 40$ A parecer uma anomalia da tendência, se nota concreto comportamento de queda, para aumento da I_{map} , Figura 5.89. Uma hipótese de causa deste comportamento seria um perfil de isotermas e viscosidade do plasma que contribua para o desvio do pó de sua trajetória até a poça, resultante do aumento da corrente do arco piloto. Outra hipótese seria vaporização de material, devido à maior potência do arco piloto.

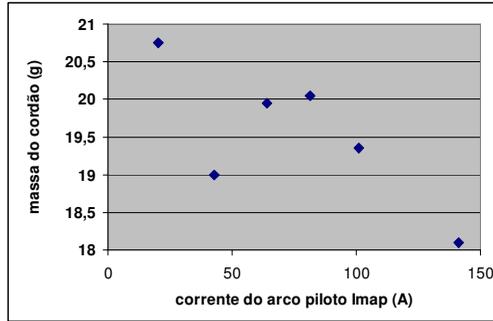


Figura 5.89. Massa do cordão depositado em 1 minuto de soldagem, sob diferentes correntes do arco piloto e corrente do arco principal fixa (parâmetros de soldagem da Tabela 5.32)

As influências da taxa de deposição e da corrente do arco piloto podem ser observadas na Figura 5.90. Nota-se que o comportamento da diluição tende a ser coerente com o da taxa de deposição. Ou seja, primeiramente se observa menor diluição para maior taxa de deposição, que se segue de um brusco aumento na diluição, devido a uma brusca queda na taxa de deposição. Com novo aumento na taxa de deposição, há nova queda na diluição. Sucede-se, então, adicional queda na diluição, apesar de a taxa de deposição ter se mantido praticamente estável. Isto indica que neste ponto, efeitos da elevada corrente do arco piloto se sobrepõe ao efeito da taxa de deposição. Especialmente neste ponto (I_{map4}), pode-se conjecturar que o perfil das isoterms tenha causado maior viscosidade do plasma sobre a poça, e, portanto, menor pressão. A partir deste ponto se observa novamente o comportamento dependente da taxa de deposição.

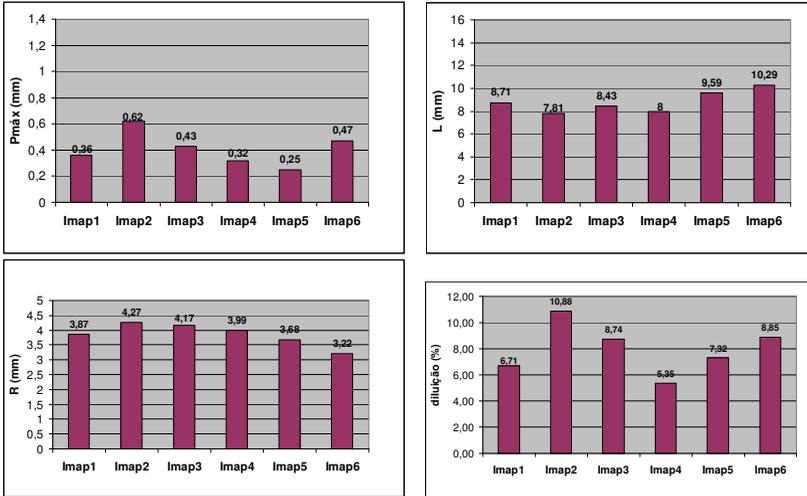


Figura 5.90. Aspectos geométricos das soldas sob diferentes correntes do arco piloto conforme Tabela 5.32

Mais uma taxa de alimentação foi verificada, para a mesma corrente do arco principal (cerca de 110 A), conforme Tabela 5.33.

Tabela 5.33. Parâmetros de soldagem PTA-P para verificação da influência da intensidade de corrente do arco piloto sobre as características da solda. Variação de regulagem apenas da corrente do arco piloto ($I_{m_{ap}}$) ($I_{m_{ap}} \approx 110$ A, $V_{mpo} = 26,0$ g/min) (parâmetros elétricos medidos via SAP)

$I_{m_{ap1}}$	$I_{m_{ap}}^*$ (A)	$U_{m_{ap}}^*$ (V)	$P_{m_{ap}}^*$ (kW)		
	65,7	19,2	1,3		
	$I_{m_{ap}}^*$ (A)	$U_{m_{ap}}^*$ (V)	$P_{m_{ap}}^*$ (kW)		
	111,6	28,3	3,2		
$I_{m_{ap2}}$	$I_{m_{ap}}^*$ (A)	$U_{m_{ap}}^*$ (V)	$P_{m_{ap}}^*$ (kW)		
	81,9	20,2	1,7		
	$I_{m_{ap}}^*$ (A)	$U_{m_{ap}}^*$ (V)	$P_{m_{ap}}^*$ (kW)		
	111,5	29,3	3,3		
$I_{m_{ap3}}$	$I_{m_{ap}}^*$ (A)	$U_{m_{ap}}^*$ (V)	$P_{m_{ap}}^*$ (kW)		
	115,2	21,8	2,5		
	$I_{m_{ap}}^*$ (A)	$U_{m_{ap}}^*$ (V)	$P_{m_{ap}}^*$ (kW)		
	111,4	30,2	3,4		
V_{gpl} (Ar) (l/min)	V_{gprot} (Ar) (l/min)	V_{ga} (Ar) (l/min)	V_s (cm/min)	V_{mpo} (g/min)	
2,0	12,0	3,5	10,0	26,0	
\varnothing_c (mm)	Re (mm)	\varnothing_e (mm)	DBP (mm)	Posição	
3,2	1,5	4,0	13,0	plana	
* valores medidos					

A Figura 5.91 retrata a tensão e potência do arco principal, e a Figura 5.92, a taxa de deposição.

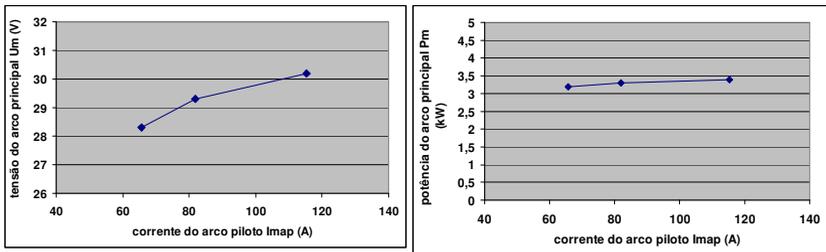


Figura 5.91. Variação da tensão e potência médias do arco principal em consequência da variação na corrente do arco piloto, conforme Tabela 5.33

Nota-se um comportamento semelhante ao anterior, em relação à queda na taxa de deposição, no gráfico $I_{m_{ap}} \times$ massa do cordão, indicando a possível existência de uma corrente intermediária do arco não transferido (mudança no grau de constrição), a partir da qual se incorre em queda brusca na taxa de deposição.

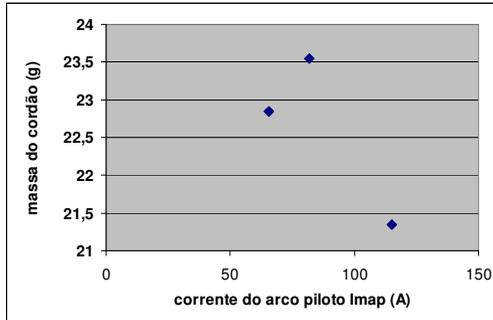


Figura 5.92. Massa do cordão depositado em 1 minuto de soldagem, sob diferentes correntes do arco piloto e corrente do arco principal fixa (parâmetros de soldagem da Tabela 5.33)

A comparação da diluição mostra, na Figura 5.93, que a partir de $I_{m_{ap1}}$ há crescimento deste valor com aumento da corrente do arco piloto. De $I_{m_{ap1}}$ a $I_{m_{ap2}}$ a diluição cresce pouco, pois há uma compensação pelo aumento da taxa de deposição. Todavia, para $I_{m_{ap3}}$, somam-se os efeitos de maior corrente do arco piloto e menor taxa de deposição, resultando em aumento visível da diluição.

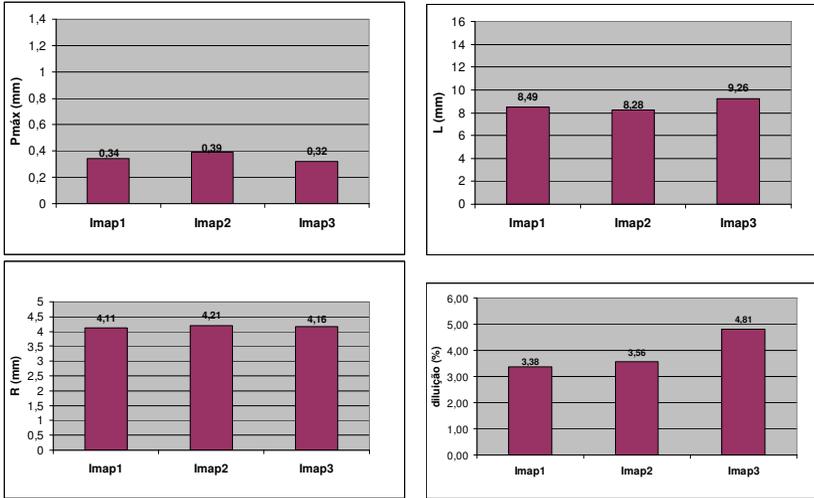


Figura 5.93. Aspectos geométricos das soldas sob diferentes correntes do arco piloto conforme Tabela 5.33

Com o intuito de se averiguar as condições resultantes para um valor de corrente intermediário, se realizaram, segundo a Tabela 5.34, ensaios a uma corrente do arco principal de aproximadamente 90 A.

Tabela 5.34. Parâmetros de soldagem PTA-P para verificação da influência da intensidade de corrente do arco piloto sobre as características da solda. Variação de regulagem apenas da corrente do arco piloto (Im_{ap}) ($Im \approx 90$ A, $V_{mpo} = 6,8$ g/min) (parâmetros elétricos medidos via SAP)

Im_{ap1}	Im_{ap}^* (A)	Um_{ap}^* (V)	Pm_{ap}^* (kW)	
	20	16,3	0,3	
	Im^* (A)	Um^* (V)	Pm^* (kW)	
	92,1	25,7	2,4	
Im_{ap2}	Im_{ap}^* (A)	Um_{ap}^* (V)	Pm_{ap}^* (kW)	
	98,4	20,8	2	
	Im^* (A)	Um^* (V)	Pm^* (kW)	
	91,6	28,2	2,6	
V_{gpl} (Ar) (l/min)	V_{gprot} (Ar) (l/min)	V_{ga} (Ar) (l/min)	V_s (cm/min)	V_{mpo} (g/min)
2,0	12,0	3,5	10,0	6,8
\varnothing_c (mm)	Re (mm)	\varnothing_e (mm)	DBP (mm)	Posição
3,2	1,5	4,0	13,0	plana
* valores medidos				

Como se vê na Figura 5.94, o padrão da tensão e potência do arco principal se repete, ao passo que a taxa de deposição se mantém praticamente constante (Figura 5.95).

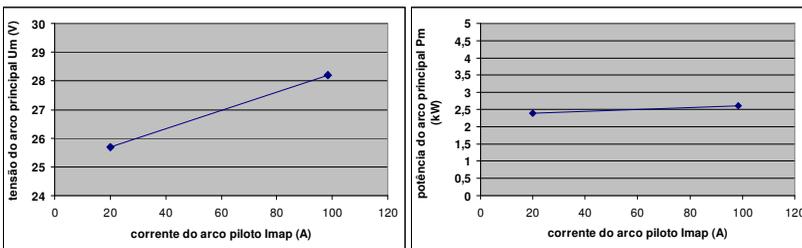


Figura 5.94. Variação da tensão e potência médias do arco principal em consequência da variação na corrente do arco piloto, conforme Tabela 5.34

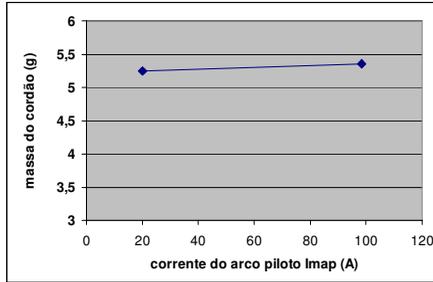


Figura 5.95. Massa do cordão depositado em 1 minuto de soldagem, sob diferentes correntes do arco piloto e corrente do arco principal fixa (parâmetros de soldagem da Tabela 5.34)

Para a taxa de deposição praticamente constante, se observa preponderância do efeito da corrente do arco piloto, com maiores $P_{máx}$ e diluição para I_{map2} , enquanto L e R se mantêm, como esperado, similares. Pode-se neste caso remeter a um possível aumento do índice de concentração do arco, estipulado em [86] (item 2.7), para crescentes correntes do arco piloto.

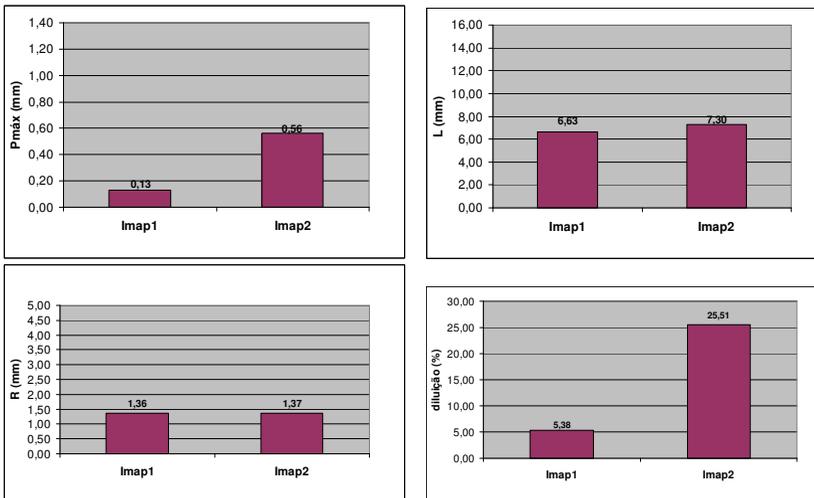


Figura 5.96. Aspectos geométricos das soldas sob diferentes correntes do arco piloto conforme Tabela 5.34

5.8.2. Considerações gerais a respeito do efeito da manipulação da corrente do arco piloto

Não se pode observar uma constante e direta relação entre a taxa de deposição e a corrente do arco piloto, que é o que se esperaria a partir dos relatos de [16, 25, 86]. Neste ponto é de suma importância mencionar o fato de que as investigações realizadas nas citadas referências relacionaram-se a tochas com injeção interna de pó. Os ensaios realizados no presente trabalho utilizaram tochas com injeção externa. Como explicado no item 2.4.1 e 5.4, há diferenças fundamentais nas características dos modelos, as quais certamente têm influência na resposta do processo à manipulação do arco piloto. Novos trabalhos poderão incluir testes com o modelo de injeção interna.

No entanto, em relação ao aporte térmico à peça, as medições calorimétricas realizadas em [86], que acusam aumento deste valor para correntes crescentes do arco piloto (Figura 2.42), podem ser relacionadas a crescentes valores de potência do arco piloto, como os medidos no presente trabalho. Os maiores valores do índice de concentração do arco, estipulado em [86] (item 2.7), para crescentes correntes do arco piloto poderiam ter sido verificados de acordo com o comportamento de $P_{máx}$. No entanto, houve relativo alto índice de variação da taxa de deposição ao longo dos ensaios, o que certamente também interferiu nos valores de $P_{máx}$.

De qualquer modo, trabalhos futuros deverão abordar este tema. Inclusive, se cogita um possível efeito benéfico do balanceamento da energia entre os dois arcos também para a soldagem fora de posição.

5.8.3. Comparação direta quanto à taxa de deposição: efeito da corrente do arco piloto x efeito da corrente do arco principal

Segundo a filosofia da técnica chamada “arco semi-transferido” [16] ou “PTA-P Combinado” [86], sua finalidade pode ser entendida como prover a possibilidade de se reduzir a corrente do arco principal e manter a taxa de deposição, pelo aumento da energia transferida ao material (e de sua temperatura) pelo arco piloto, com aumento de sua corrente, como ilustrado nas Figuras 2.43 e 2.44 do item 2.7.

O item 5.6 relatou o comportamento de parâmetros e resultados das soldas para diferentes combinações de corrente do arco principal e taxa de alimentação, quando se alterava a corrente do arco piloto. No presente sub-item, foi verificada diretamente a filosofia citada no pará-

grafo anterior, comparando-se o comportamento da taxa de deposição sob variações isoladas da corrente do arco piloto e do arco principal.

A Figura 5.97 mostra que, para as condições de soldagem do ensaio (Tabela 5.30, do item 5.6), uma corrente do arco principal de 120 A é capaz de depositar 9,7 g/min, dos 9,8 g/min alimentados (aproximadamente 99 % de eficiência de deposição). Reduzidas correntes do arco principal, a uma fixa corrente do arco piloto (20 A) resultaram em redução nas taxas de deposição, como esperado. Porém, quando a corrente do arco principal foi reduzida para 80 A, correntes do arco piloto mais altas não foram capazes de manter a taxa de deposição,

Reitera-se que os resultados de Marconi [16] e Diltney [86] foram obtidos com outro tipo de tocha de soldagem (injeção interna). Além disso, o comportamento pode se diferenciar para outras faixas de correntes do arco principal e piloto em interação.

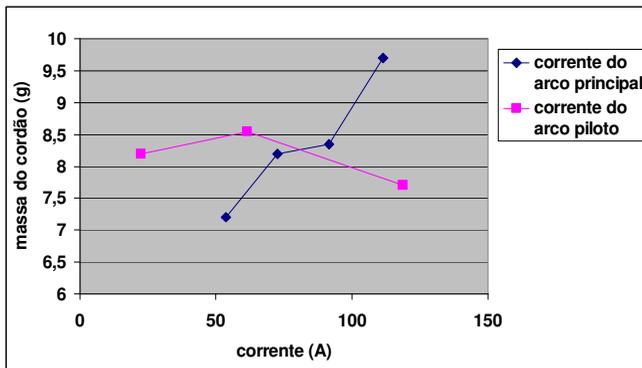


Figura 5.97. Massa do cordão depositado em 1 minuto de soldagem, para comparação do efeito das correntes do arco principal e do arco piloto, isoladamente

5.9. Gases

Como visto na Fundamentação Teórica, vários trabalhos abordaram ou expuseram considerações sobre a influência dos gases do processo PTA-P sobre o resultado da solda. A utilização de Ar como gás de plasma é um consenso quase geral. Os outros gases de soldagem, além de promoverem o carreamento mecânico das partículas metálicas e proteção do banho metálico líquido e em solidificação, também exercem

influência sobre as propriedades físico-químicas do plasma e da poça de fusão. Desta maneira, foram exploradas diferentes misturas gasosas (tanto em composições químicas como seus teores) para o gás de arraste, gás de plasma, assim como para o gás de proteção. Quanto ao último, foram abordadas primordialmente misturas de Ar e H₂, enquanto para o gás de arraste a quantidade de composições químicas testadas foi maior.

De fato, a literatura menciona que a composição química do gás de proteção influencia esteticamente na solda, por propiciar, por exemplo com adições de H₂, um ambiente com propriedades redutoras. Já o gás de arraste teria mais potencial para exercer influência mais contundente sobre a estrutura e geometria da solda, devido ao fato de estar presente em regiões mais próximas à poça de fusão e à coluna do arco.

5.9.1. Gás de arraste

5.9.1.1. Gás He

Segundo a Tabela 5.35, se realizou a bateria de ensaios com gás He e sua mistura com Ar no gás de arraste de pó.

Tabela 5.35. Parâmetros de ensaios de soldagem para verificação da influência do gás He no gás de arraste de pó do processo PTA-P (valores medidos via SAP)

Ar			Ar+50%He			He		
Im* (A)	Um* (V)	Pm* (kW)	Im* (A)	Um* (V)	Pm* (kW)	Im* (A)	Um* (V)	Pm* (kW)
111,5	31,7	3,5	111,3	32,1	3,6	111,3	33,8	3,8
Vgprot (l/min)		Vga (l/min)	Vgpl (l/min)		Vs (cm/min)		DBP (mm)	
12,0 (Ar)		3,5	2,0 (Ar)		10,0		13,0	
Vm _{po} (g/min)		Øc (mm)	Re (mm)		Øe (mm)		Posição	
9,8		3,2	3,5		4,0		plana	
* valores medidos								

Para melhor visualização do efeito do He sobre os parâmetros de soldagem quando adicionado ao gás de arraste no processo PTA-P, o gráfico da Figura 5.98 exprime a tensão e potência de soldagem relati-

vos à Tabela 5.35. Nota-se um crescimento esperado de ambos os valores, que pode ser atribuído ao maior potencial de ionização do He.

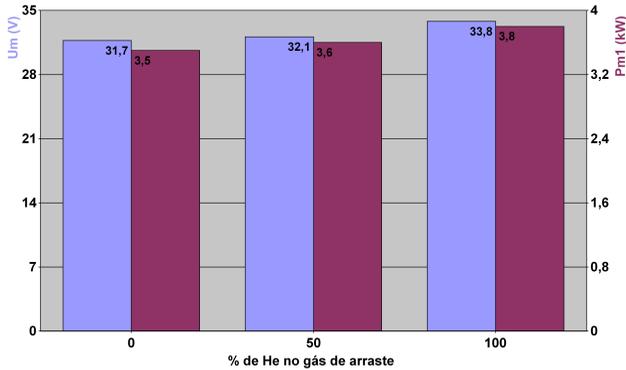


Figura 5.98. Variação da tensão e potência médias do arco principal em consequência da variação na composição do gás de arraste, conforme Tabela 5.35

Na Figura 5.99 se vê leve superioridade na taxa de deposição para a situação intermediária, em relação aos extremos. A Figura 5.100 mostra que a geometria do cordão e sua diluição acompanham o crescimento da potência de soldagem. Para o valor intermediário (50%Ar+50%He no gás de arraste) se observa a influência da maior taxa de alimentação, pois apesar de L aumentar, R permanece praticamente constante, em relação ao Ar puro.

Durante a soldagem nota-se que há menor depressão da poça quando se adiciona He ao gás de arraste, provavelmente devido à maior viscosidade, menor velocidade e conseqüente menor pressão sobre a poça [68]. No entanto, a maior potência e melhor condutividade térmica do He prevalecem e a penetração e diluição aumentam.

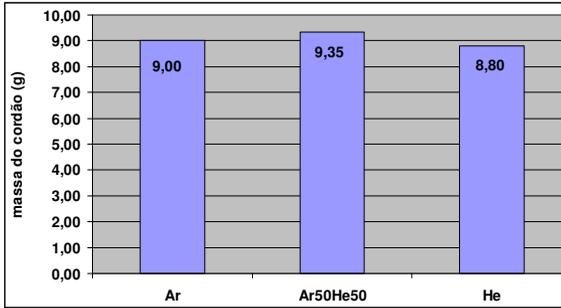


Figura 5.99. Massa do cordão depositado em 1 minuto de soldagem, verificação do efeito do gás He no gás de arraste (soldas relativas à Tabela 5.35)

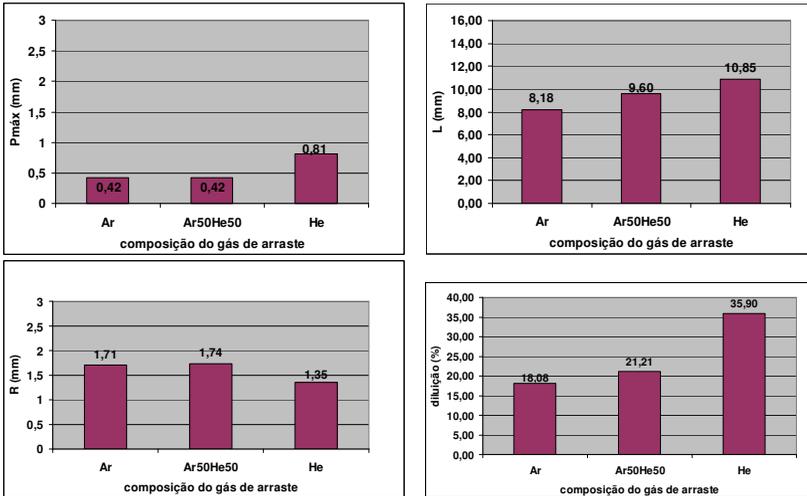


Figura 5.100. Aspectos geométricos das soldas sob diferentes composições do gás de arraste, conforme Tabela 5.35

5.9.1.2. Gás N₂

As experiências com adição de N₂ ao gás de arraste se encontram descritas na Tabela 5.36. A adição deste elemento ao metal de solda tem potencial para melhorias metalúrgicas, com aumento da resistência à abrasão [102] e à cavitação [103].

A tensão e potência de soldagem apresentam relação direta com o teor de N_2 (Figura 5.101). Este comportamento pode estar relacionado ao fato de que, apesar de não apresentar maior potencial de ionização que o Ar puro (em eV), para dissociação e ionização térmica demanda consideravelmente mais entalpia que o segundo Marconi [16]. Em [68], Schnick relata que o N_2 , assim como o He, ocasiona resfriamento da periferia do arco e o constringe, o que também pode contribuir para o aumento da tensão e potência.

Tabela 5.36. Parâmetros de ensaios de soldagem para verificação da influência do gás N_2 no gás de arraste de pó do processo PTA-P, (valores medidos via SAP)

Ar+5% N_2			Ar+10% N_2			Ar+20% N_2		
Im* (A)	Um* (V)	Pm* (kW)	Im* (A)	Um* (V)	Pm* (kW)	Im* (A)	Um* (V)	Pm* (kW)
111,2	32,5	3,6	111,1	34,3	3,8	111,0	35,0	3,9
Ar+50% N_2								
Im* (A)	Um* (V)	Pm* (kW)						
110,7	38,0	4,2						
Vgprot (l/min)		Vga (l/min)	Vgpl (l/min)	Vs (cm/min)	DBP (mm)			
12,0 (Ar)		3,5	2,0 (Ar)	10,0	13,0			
Vm _{po} (g/min)		Øc (mm)	Re (mm)	Øe (mm)	Posição			
9,8		3,2	3,5	4,0	plana			
* valores medidos								

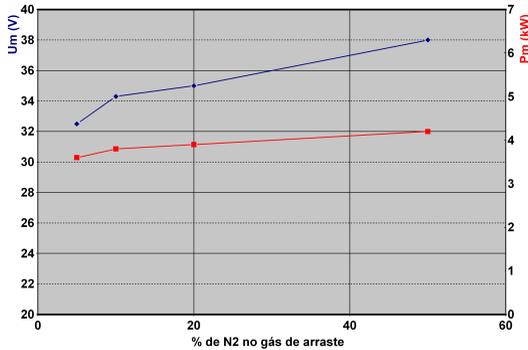


Figura 5.101. Variação da tensão e potência médias do arco principal em consequência da variação na composição do gás de arraste, conforme Tabela 5.36

O reflexo da adição de N₂ no gás de arraste sobre o cordão de solda pode ser observado na Figura 5.102. Como, com exceção do primeiro cordão, se observou extrema turbulência da poça e porosidade, não se considerou coerente a realização de medições geométricas, além deste. A geometria do primeiro cordão (apesar de certa porosidade) se encontra na Figura 5.103. Sua taxa de deposição foi 7,8 g/min.

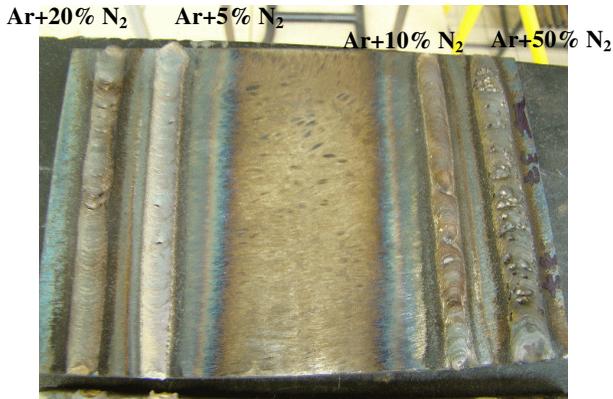


Figura 5.102. Aspectos geométricos das soldas sob diferentes composições do gás de arraste, conforme Tabela 5.36 (ordem dos cordões, da esquerda para a direita: Ar+20% N₂, Ar+5% N₂, Ar+10% N₂, Ar+50% N₂)

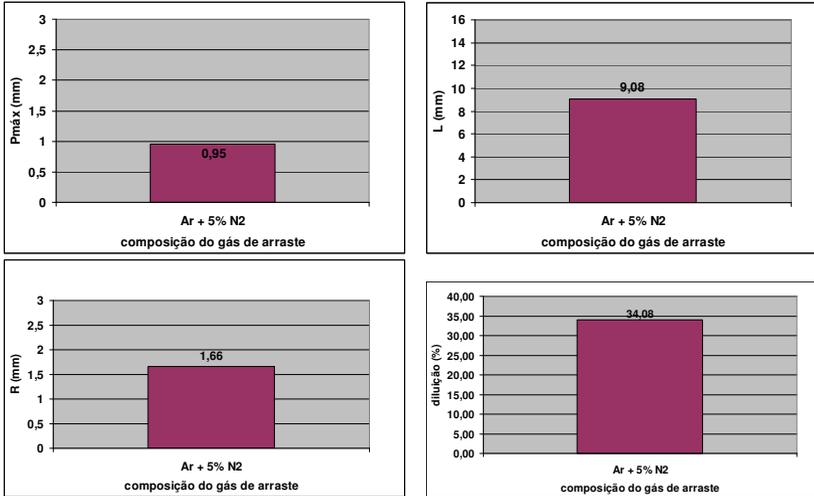


Figura 5.103. Aspectos geométricos da solda com adição de 5% de N_2 ao gás de arraste, conforme Tabela 5.36

As soldas resultaram em intensa contaminação da tocha por respingos, tamanha a turbulência da poça de fusão, como ilustra o exemplo da Figura 5.104, com adição de 50% de N_2 .



Figura 5.104. Contaminação da tocha por respingos oriundos da turbulência da poça metálica sob altos teores de N_2 no gás de arraste

5.9.1.3. Gás H_2

Apesar de a literatura citar adições de H_2 primordialmente ao gás de proteção, este gás foi testado também em adições ao Ar no gás de arraste (Tabela 5.37). Nota-se comportamento crescente da tensão e potência de soldagem (Figura 5.105), cuja razão pode ser atribuída ao

mesmo efeito descrito para o N_2 , anteriormente. A taxa de deposição está ilustrada na Figura 5.106.

Tabela 5.37. Parâmetros de ensaios de soldagem para verificação da influência do gás H_2 no gás de arraste de pó do processo PTA-P, (valores medidos via SAP)

Ar+5% H_2			Ar+10% H_2			Ar+20% H_2		
Im* (A)	Um* (V)	Pm* (kW)	Im* (A)	Um* (V)	Pm* (kW)	Im* (A)	Um* (V)	Pm* (kW)
111,2	33,1	3,7	111,1	34,0	3,8	110,7	38,8	4,3
Vgprot (l/min)		Vga (l/min)		Vgpl (l/min)		Vs (cm/min)		
12,0 (Ar)		3,5		2,0 (Ar)		10,0		
Vm _{po} (g/min)		Øc (mm)	Re (mm)	Øe (mm)	DBP (mm)	Posição		
9,8		3,2	3,5	4,0	13,0	plana		
* valores medidos								

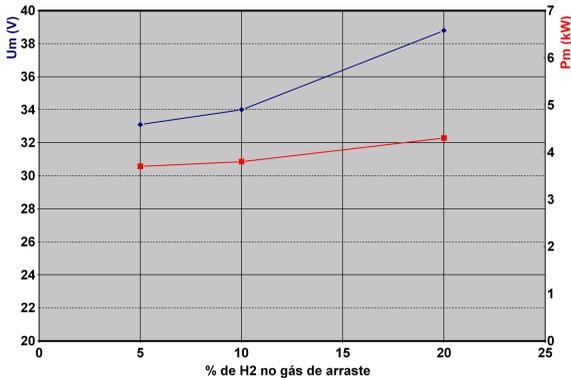


Figura 5.105. Variação da tensão e potência médias do arco principal em consequência da variação na composição do gás de arraste, conforme Tabela 5.37

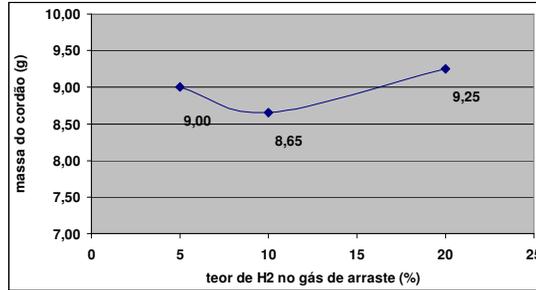


Figura 5.106. Massa do cordão depositado em 1 minuto de soldagem, verificação do efeito do gás H₂ no gás de arraste (soldas relativas à Tabela 5.37)

Apesar de uma leve tendência a uma maior taxa de deposição para maior teor de H₂, esta diferença ainda foi muito baixa para possível sobrepujamento ao efeito do crescimento da potência de soldagem sobre a geometria da solda. A isso se soma ainda a maior condutividade térmica do H₂ e o fato de ele se recombinar ao entrar em contato com a peça, o que torna ainda mais eficiente a transferência de calor a esta. Desta maneira, como se vê na Figura 5.107, P_{máx}, diluição e L aumentaram, enquanto R diminui para maiores teores de H₂ no gás de arraste.

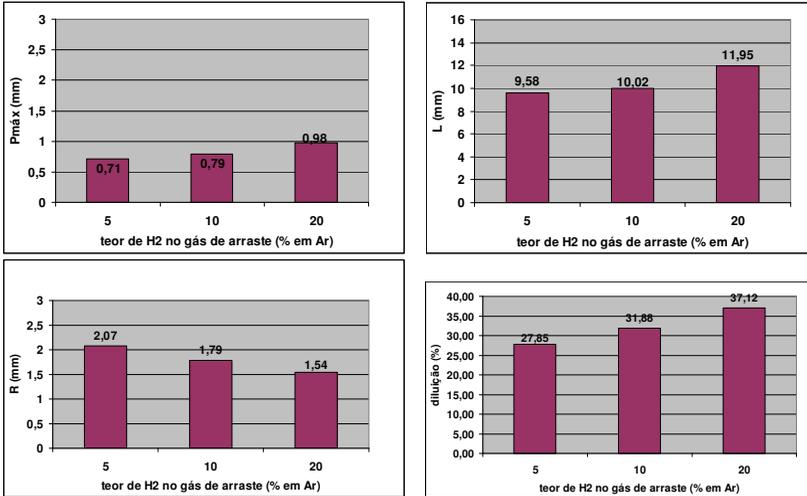


Figura 5.107. Aspectos geométricos das soldas sob diferentes composições do gás de arraste, conforme Tabela 5.37

5.9.2. Adição de H₂ ao gás de proteção e fatores estéticos

Diferentes teores de H₂ adicionados ao Ar no gás de proteção foram testados quanto à sua influência sobre a solda, conforme os dados da Tabela 5.38. Quanto aos parâmetros elétricos, nota-se semelhança com a resposta obtida na atuação de teores de H₂ sobre o gás de arraste (com leve menor intensidade), Figura 5.108.

Tabela 5.38. Parâmetros de ensaios de soldagem para verificação da influência do gás H₂ no gás de proteção do processo PTA-P, (valores medidos via SAP)

Ar+5% H ₂			Ar+10% H ₂			Ar+20% H ₂		
Im* (A)	Um* (V)	Pm* (kW)	Im* (A)	Um* (V)	Pm* (kW)	Im* (A)	Um* (V)	Pm* (kW)
111,3	33,6	3,7	111,0	34,8	3,9	110,8	37,5	4,1
Vgprot (l/min)		Vga (l/min)			Vs (cm/min)		Vgpl (l/min)	
12,0		3,5 (Ar)			10,0		2,0 (Ar)	
Vm _{po} (g/min)		Øc (mm)	Re (mm)	Øe (mm)		Posição		
9,8		3,2	3,5	4,0		plana		
* valores medidos								

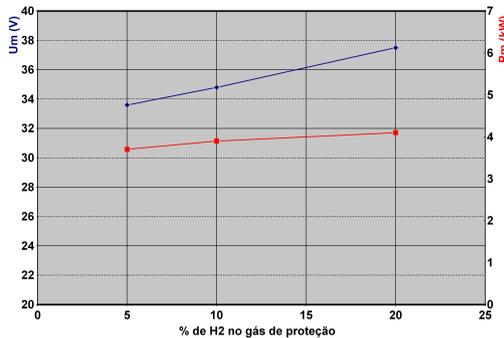


Figura 5.108. Variação da tensão e potência médias do arco principal em consequência da variação na composição do gás de arraste, conforme Tabela 5.38

A taxa de deposição se mostrou praticamente constante (Figura 5.109). Deste modo, os aspectos geométricos do cordão seguiram o aumento da potência de soldagem, com provável colaboração da melhor condutividade térmica do H₂ e de sua recombinação sobre a peça, como pode ser visto na Figura 5.110.

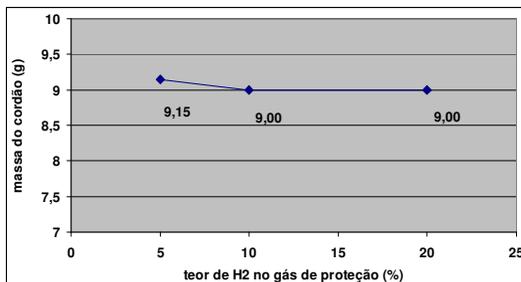


Figura 5.109. Massa do cordão depositado em 1 minuto de soldagem, verificação do efeito do gás H_2 no gás de proteção (soldas relativas à Tabela 5.38)

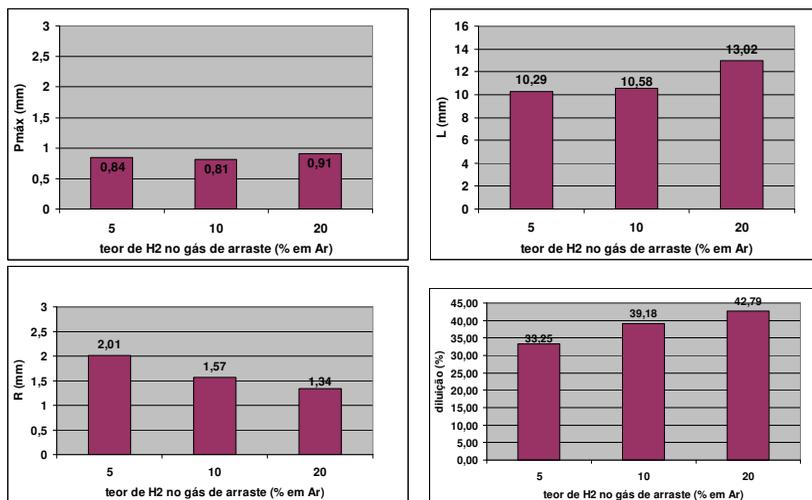


Figura 5.110. Aspectos geométricos das soldas sob diferentes composições do gás de proteção, conforme Tabela 5.38

A influência de adições de H_2 ao gás de proteção sobre o acabamento da solda é usualmente descrita como positiva e resultante da característica redutora desse gás, reduzindo a oxidação da superfície do cordão. No entanto, não se encontraram comparações qualitativas ou quantitativas a respeito desse efeito na literatura.

Quanto ao fator estético da solda, de fato se obteve no presente trabalho um cordão mais liso e “limpo” com adição de H_2 e seu efeito de

redução. O efeito é mais pronunciado quando o gás é adicionado ao Ar no gás de arraste.

Com Ar puro no gás de arraste e proteção, o cordão resulta, nas condições ensaiadas, rugoso (provavelmente maior oxidação) e heterogêneo. Em relação ao gás de arraste, se observa melhor aspecto estético para um teor de 10 % de H_2 , sendo que para 5 % ainda se observa rugosidade e para 20 %, uma camada escura e rugosa, provavelmente proveniente de oxidação. Isto pode ser consequência do elevado tamanho da poça metálica em solidificação, que, então, se expande além da cortina do gás de proteção, ficando exposta à atmosfera.

Ao se fazer a mistura no gás de proteção observa-se a mesma evolução. As soldas podem ser comparativamente vistas na Figura 5.111, que evidencia o melhor resultado para uma adição de 10% de H_2 no Ar no gás de arraste, numa comparação geral. Ao se considerar o custo da solda, se vê aqui uma vantagem, pois a vazão do gás de arraste é menor que a vazão do gás de proteção (após a soldagem, houve limpeza superficial apenas com jato de ar comprimido. A fuligem que se nota ao lado de alguns cordões se atribui a partículas de granulometrias finas).

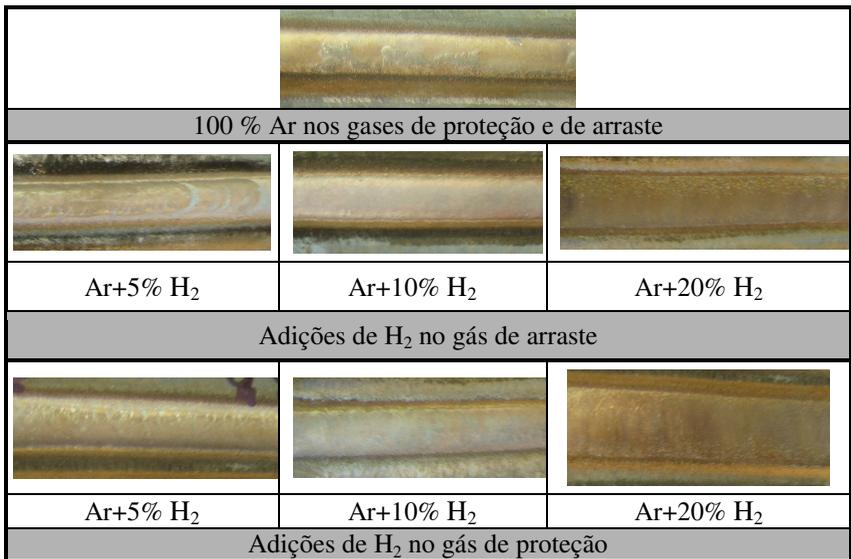


Figura 5.111. Aspectos superficiais das soldas, com diferentes teores de H_2 no gás de arraste e gás de proteção

5.9.3. Efeito dos gases sobre a proteção da tocha

A partir de uma técnica sugerida na literatura [62] (item 2.13), se testou a eficiência da combinação de misturas de Ar e He no gás de plasma e Ar e H₂ no gás de proteção na redução da contaminação da tocha por vapores metálicos e partículas semi-fundidas.

Neste contexto e de acordo com a disponibilidade de gases comerciais e misturador de gases no LABSOLDA, foram realizados os ensaios descritos a seguir.

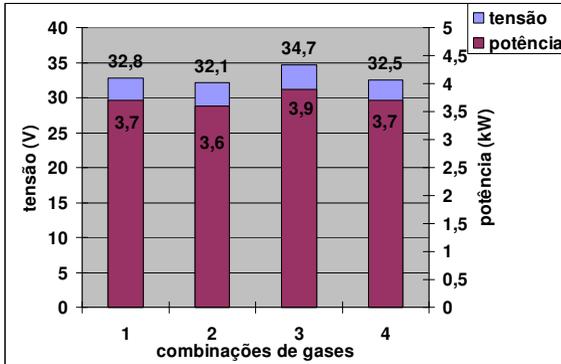
Primeiramente, há de se mencionar que a única situação na qual se observou clara contaminação do bico constritor e do bocal do gás de proteção, no âmbito do presente trabalho, foi com adições de N₂ ao gás de arraste. Realmente, respingos aderidos à tocha já numa fração de 5% de N₂ resultariam, em aplicações industriais de larga escala, em prejuízos oriundos da obstrução dos canais injetores de pó, do orifício constritor e do canal do gás de proteção, quais sejam: reduzida vida útil das partes, tempos secundários de limpeza da tocha e troca das partes, defeitos na solda por irregularidades nos fluxos de gás e pó.

Conduziu-se uma bateria de ensaios, com variações nos gases de plasma e de proteção, conforme a Tabela 5.39, para uma mistura constante de 95%Ar+5%N₂ no gás de arraste. Essa atividade teve como objetivo determinar a eficácia das combinações dos gases e o grau de contribuição de cada um, na redução da contaminação da tocha por adesão de respingos.

Tabela 5.39. Parâmetros de ensaios de soldagem para verificação da eficácia de diferentes combinações de gases de proteção e de arraste na redução da contaminação da tocha de soldagem PTA-P, (valores medidos via SAP)

<u>Combinação 1</u> Gás de proteção: Ar Gás de plasma: Ar			<u>Combinação 2</u> Gás de proteção: Ar Gás de plasma: Ar+25%He			<u>Combinação 3</u> Gás de proteção: Ar+5%H ₂ Gás de plasma: Ar+25%He		
Im* (A)	Um* (V)	Pm* (kW)	Im* (A)	Um* (V)	Pm* (kW)	Im* (A)	Um* (V)	Pm* (kW)
111,5	32,8	3,7	112,9	32,1	3,6	112,9	34,7	3,9
<u>Combinação 4</u> Gás de proteção: Ar+5%H ₂ Gás de plasma: Ar								
Im* (A)	Um* (V)	Pm* (kW)						
112,6	32,5	3,7						
Vgprot (l/min)		Vga (l/min)		Vs (cm/min)		Vgpl (l/min)		
12,0		3,5 (95%Ar+5%N ₂)		10,0		2,0		
Vm _{po} (g/min)		Øc (mm)	Re (mm)	Øe (mm)	DBP (mm)	Posição		
9,8		3,2	3,5	4,0	13,0	plana		
* valores medidos								

Para melhor visualização, se mostra o comportamento das potências e tensões no gráfico da Figura 5.112.



Combinações de gases	1	Gás de proteção: Ar Gás de plasma: Ar
	2	Gás de proteção: Ar Gás de plasma: Ar+25%He
	3	Gás de proteção: Ar+5%H ₂ Gás de plasma: Ar+25%He
	4	Gás de proteção: Ar+5%H ₂ Gás de plasma: Ar

Figura 5.112. Variação da tensão e potência médias do arco principal em consequência da variação na composição do gás de arraste e do gás de proteção, conforme Tabela 5.39

O gás que mais tem efeito sobre a redução da contaminação da tocha quanto à adesão de respingos às suas partes, nas condições ensaiadas, é o H₂ adicionado ao gás de proteção, como pode ser concluído das fotos pós-solda da tocha PTA-P, Figura 5.113. Quando utilizada apenas mistura de He no gás de plasma, o efeito de proteção da tocha não é significativo.

Por outro lado, não se pode confirmar o mecanismo descrito em [62]. Na realidade, quando houve a presença de H₂, se percebeu menor borbulhamento (turbulência) da poça. Ou seja, pode-se propor a hipótese de que há uma combinação de mecanismos que protegem a tocha: a maior temperatura e condutividade térmica possibilitam a formação do filme óxido autorenovante (levantado em [62]) e uma menor oxidação da poça, resultante do ambiente redutor formado pelo H₂, reduz a turbulência e formação de respingos. A melhor fluidez da poça também pode ter colaborado neste sentido.

Na Figura 5.114, pode-se observar maior largura do cordão depositado com a combinação 3 que com a combinação 2, indicativo da maior fluidez. Na mesma foto, fica evidente o melhor aspecto superficial do cordão (mais “limpo”, liso e regular e isenção de poros) e a diferença de coloração, que indicam também menor oxidação para a combinação 3.

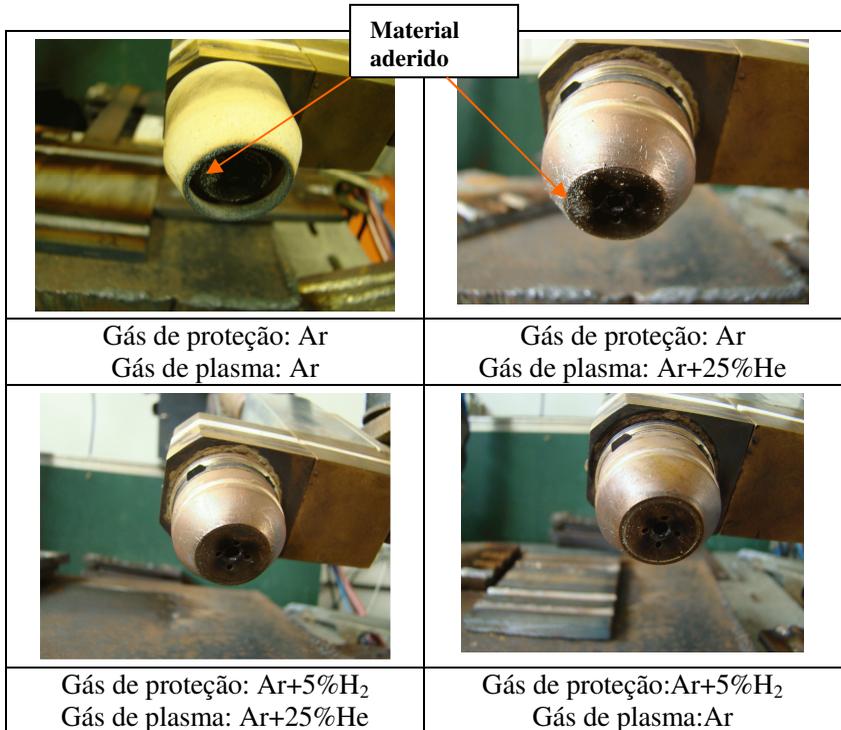


Figura 5.113. Situação da tocha em relação a material aderido, oriundo de turbulência na poça metálica (respingos), para as diferentes combinações de gases de proteção e de plasma, para composição fixa do gás de arraste em 95%Ar+5%N₂

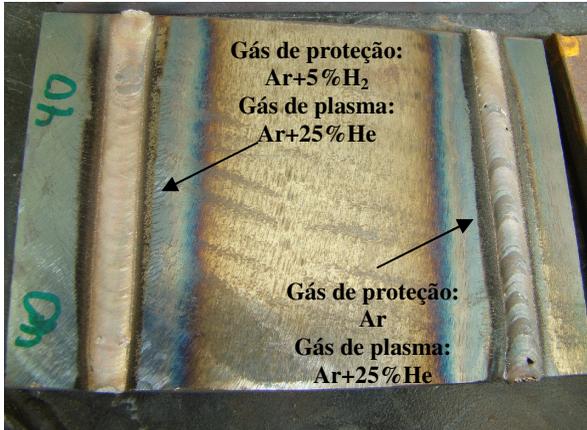


Figura 5.114. Aspecto superficial dos cordões realizados com a combinação 3 (à esquerda) e 2 (à direita) dos gases de proteção de plasma, conforme a Tabela 5.39

5.10. Pós metálicos

5.10.1. Escoabilidade

A propriedade dos pós metálicos chamada escoabilidade e suas características morfológicas detêm decisiva importância para o processo de soldagem PTA-P, como explicado no item 2.12. O presente trabalho propõe a inserção do PTA-P em setores industriais que ainda não o utilizam, impondo certas condições específicas de campo. Tanto o setor de geração hidrelétrica como o de petróleo e gás apresentam tipicamente ambientes de elevada umidade atmosférica, a qual pode vir a afetar o material de adição em pó, como conhecidamente acontece com o Eletrodo Revestido, e, em consequência sua escoabilidade. Desta maneira, uma metodologia de controle periódico da escoabilidade do pó seria aconselhável, em condições industriais.

Foram conduzidos, neste contexto, ensaios de escoabilidade antes e após secagem do material metálico em pó em estufa a 50° C por 72 horas. Procedimentos de secagem de pós para PTA-P são sugeridos na literatura. O material utilizado foi o FeCrMnNi, da empresa Cogne, que trouxe a escoabilidade medida em fábrica no certificado de fornecimento. Sua morfologia pode ser observada na Figura 5.115.

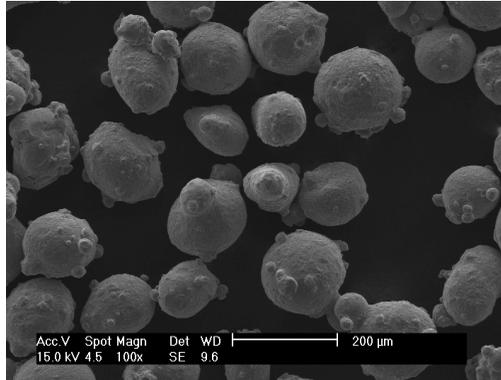


Figura 5.115. Material metálico (FeCrMnNi-Cogne) em pó para PTA-P utilizado em ensaios de escoabilidade

Os resultados demonstraram que não houve diferença significativa na escoabilidade do material, nas duas situações (25,4 s/50g antes e 24,1 s/50g depois da secagem). Sendo assim, acredita-se que os procedimentos de secagem são recomendados exclusivamente para eliminação de defeitos de solda. (No presente trabalho, uma manta térmica com temperatura controlada em 70° C foi incorporada ao silo. Estudos acerca da eficácia desta técnica serão alvo de projetos subsequentes.)

No entanto, ambas as medidas diferiram do valor apresentado no certificado, que é 14,7 s/50g. Decidiu-se, então, por realizar esta verificação com outro material (Fe 250N-P), fornecido por outra empresa, cuja escoabilidade também foi informada (16,6 s/50g). O resultado obtido novamente diferiu do relatado no certificado. Seria esperado que se atingisse um valor maior que o medido para o primeiro material, pois o valor nominal é maior. No entanto, se mediu uma escoabilidade de 21,0 s/50g, ou seja, não houve um padrão. Estes resultados levam a se acreditar que os procedimentos, assim como o aparato de medição (e sua calibração) em cada instituição possam diferir em alguns pormenores. Apesar de a norma ASTM B213 estipular a geometria do funil de medição, não são definidos materiais para os mesmos ou acabamento superficial requerido. Ela apenas recomenda um fornecedor do instrumento e do pó para calibração. Portanto, se recomenda que cada usuário do processo disponha de um instrumento para determinar o seu padrão e suas medições.

5.10.1.1. Influência da granulometria sobre a escoabilidade e condições de alimentação

Uma das propriedades do material em pó que afeta a escoabilidade é sua faixa granulométrica. Com o intuito de averiguar esta influência para o aço 316 L, foram conduzidas medições com uma amostra com faixa granulométrica de 11 μm – 45 μm , 50 μm – 90 μm e 53 μm – 180 μm (todos com morfologia esférica), cujos resultados estão na Tabela 5.40.

Tabela 5.40. Escoabilidade de pós de diferentes granulometrias do aço 316 L

	11 μm - 45 μm	50 μm - 90 μm	53 μm - 180 μm
Escoabilidade (s/50g)	-	18,6	23,9

Apesar de o valor da segunda faixa ser inferior, esta não apresentou características de um pó “livremente escoável” (“free flowing”), ou seja, houve necessidade de um estímulo inicial (leve impacto) no funil para que começasse a fluir. A primeira faixa, apesar de também possuir morfologia esférica, não apresentou escoabilidade, pois o material se compactou e não fluiu, mesmo com estímulos, corroborando o exposto em [16], em relação a pós muito finos .

Em alimentadores que possuem um canal de queda, como o comercial PM-PF-10, ou o ADP-1, o impacto da escoabilidade é notório e determinante: caso o material se compacte, ele não vai fluir e não se possibilitará alimentação de pó ao processo (isto foi observado na prática). Para o ADP-2, desenvolvido no presente trabalho, a sensibilidade à escoabilidade do pó é reduzida, mas ainda se faz presente. A Tabela 5.41 mostra que a uma rotação fixa do cilindro dosador, houve substancial redução na taxa de alimentação do pó da primeira faixa granulométrica da Tabela 5.40, anterior. Para que se atingisse uma taxa de alimentação próxima àquela com a terceira faixa granulométrica, foi necessário aumento considerável da regulação de rotação do ADP-2.

Tabela 5.41. Taxa de alimentação x rotação do cilindro dosador do ADP-2, para pós de diferentes faixas granulométricas

	11 μm - 45 μm	53 μm - 180 μm
Taxa de alimentação a 9,5 rpm	4,7 g/min	18,3 g/min
	Rotação requerida para taxa de alimentação de 20,0 g/min (ensaiada)	Taxa de alimentação teórica a 34 rpm (calculada)
	34 rpm	64,0 g/min

5.10.2. Influência da granulometria sobre a solda

À parte das influências operacionais das propriedades do pó na alimentação de material, foi decidido investigar também suas influências sobre o depósito soldado pelo processo PTA-P. Assim sendo, de acordo com os parâmetros da Tabela 5.42, foram realizados ensaios de soldagem com pós relativos à Tabela 5.40. Note-se que a rotação do ADP-2 teve que ser ajustada, para que a taxa de alimentação do pó mais fino se aproximasse à do pó para PTA-P.

Tabela 5.42. Parâmetros de ensaios de soldagem para verificação da influência da granulometria do pó na soldagem PTA-P (valores medidos via SAP)

11 μm - 45 μm				53 μm - 180 μm			
Im* (A)	Um* (V)	Pm* (kW)	Vmpo (g/min)	Im* (A)	Um* (V)	Pm* (kW)	Vmpo (g/min)
131,1	37,9	5,0	20,0	131,8	28,4	3,7	20,3
Vgpl (l/min)		Vgprot (l/min)		Vga (l/min)		Vs (cm/min)	
2,0 (Ar)		12,5 (Ar)		3,5 (Ar)		10,0	
Øc (mm)		Re (mm)		Øe (mm)		Posição	
3,2		3,5		4,0		plana	
						DBP (mm)	
						13,0	
* valores medidos							

É notório o aumento da tensão e potência resultantes quando da soldagem com pó mais fino que o recomendado para PTA-P. Não se analisou mais a fundo esta questão ou se levantou embasamento para

uma hipótese mais elaborada. Acredita-se, no entanto, que a maior área superficial de troca de calor, imposta pelo pó de menor granulometria, acaba retirando mais energia do arco, originando a demanda por maior diferença de potencial para manutenção da corrente de soldagem regulada. As influências mais evidentes, observadas na face da solda e nas seções transversais da Figura 5.116, são sobre a quantidade de fuligem (partículas altamente oxidadas desviadas do devido trajeto até a poça de fusão ou vapor metálico condensado, como descrito em [67], e referenciado no item 2.5) depositada sobre a chapa, a penetração máxima e diluição da solda. Neste ponto se levanta uma questão quanto à situação das partículas oxidadas, pois o material é um aço inoxidável. Futuramente, serão realizadas análises do material depositado para devida caracterização.

Conforme referenciado no item 2.12, Marconi [16] recomenda, sem mencionar um valor, que se limite o valor mínimo da faixa granulométrica, pois partículas muito pequenas sofrem forte oxidação no processo PTA-P. Esta camada de oxidação pode vir a prejudicar passes posteriores, configurar um ambiente mais insalubre, gerar mais resíduos e contaminar a tocha e outros elementos do sistema, comprometendo o funcionamento e vida útil.

Para se verificar possível maior grau de oxidação do metal de solda no caso do pó de granulometria mais fina, foram conduzidas análises químicas via MEV de pontos diversos da seção transversal. Conforme mostra a Tabela 5.43, houve de fato influência da granulometria do material em pó.

Em relação à maior penetração e diluição verificadas (concordando com Pavlenko [35]), podem-se atribuir à maior potência, para taxa de deposição similar (que se pode concluir da geometria da solda). Pode-se somar ainda o fato descrito em [85], que relata que partículas de menor tamanho atingem a poça numa temperatura mais elevada do que partículas de maior tamanho.

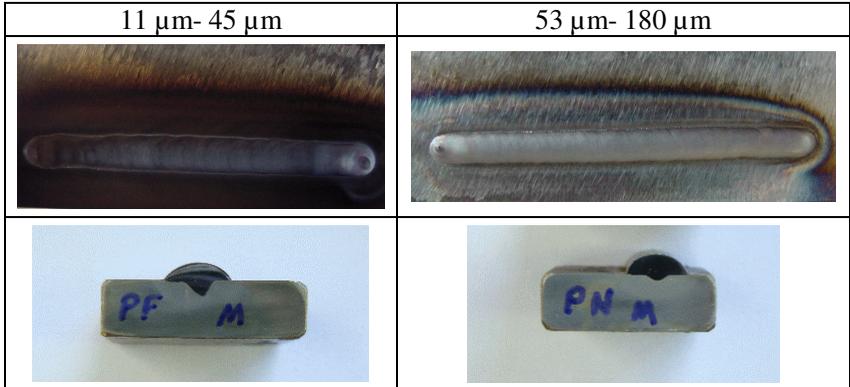


Figura 5.116. Aspecto superficial e macrografia das seções transversais de cordões de solda depositados por PTA-P e pós de mesma composição química (AISI 316L), morfologia esférica e granulometrias diferentes

Tabela 5.43. Oxidação do metal de solda em cordões depositados por PTA-P e pós de mesma composição química (AISI 316L), morfologia esférica e granulometrias diferentes (teor de O avaliado no MEV, sujeito a erros intrínsecos. Outras análises mais confiáveis poderão ser realizadas para verificação.)

	Análise quantitativa da presença de oxidação (% O)
11 μm - 45 μm	1,74
53 μm - 180 μm	0,15

A Figura 5.117 mostra as propriedades geométricas das soldas.

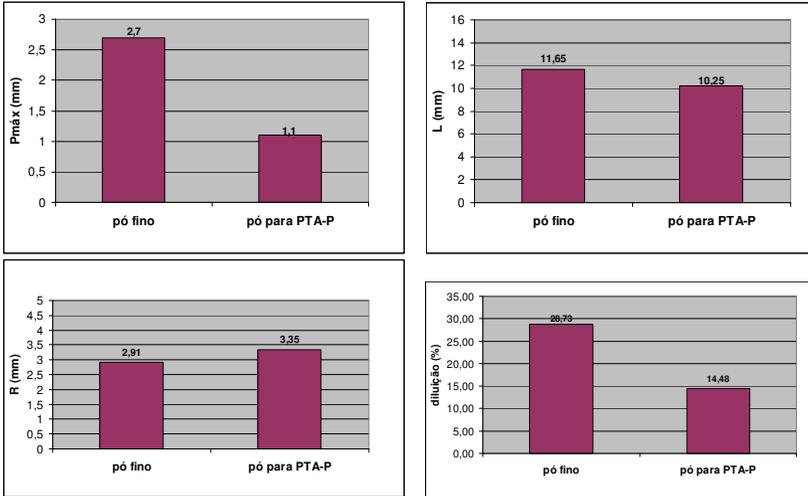


Figura 5.117. Aspectos geométricos das soldas sob diferentes correntes do arco piloto conforme Tabela 5.42

6. CONCLUSÕES

Apesar do grau de conhecimento tecnológico e científico disponível acerca do processo de soldagem Plasma, sua versão com alimentação de material em pó, chamada no presente trabalho de PTA-P, ainda se encontra em uma fase evolutiva, na qual não apenas influência de parâmetros, mas inclusive novos parâmetros estão sendo estabelecidos. De fato, todos os processos de soldagem a arco estão sob constante atualização, porém com fundamentos mais solidamente estabelecidos.

A natureza do material de adição, quanto à sua forma, impinge ao PTA-P uma complexidade adicional ao processo como um todo, desde o projeto da tocha de soldagem, passando pelo projeto do sistema de dosagem e alimentação de pó, até a determinação de procedimentos de soldagem com diferentes gases e em diferentes posições de soldagem. Tanto é verdade, que não há um consenso quanto a uma construção básica de tocha de soldagem, ou quanto a um sistema de adição de pó e nem mesmo quanto à possibilidade de se soldar fora de posição. Da mesma forma, a faixa de utilização do processo, apesar de todas as aplicações citadas no texto, é estreita, em relação a materiais envolvidos e aplicações, comparando-se com outros processos a arco. Citações sobre soldagem fora da posição plana são raras e abordam exclusivamente trabalhos de pesquisa, que representam a vanguarda do que se está realizando com o PTA-P em âmbito mundial.

A necessidade de maturação do processo se reflete também na notável lacuna existente em relação a fornecedores de materiais de adição, equipamentos e tochas de soldagem PTA-P fora dos países desenvolvidos.

O presente trabalho contribuiu para mostrar que, apesar da complexidade e dos desafios, o processo PTA-P se justifica como alvo de projetos de P&D, devido à sua flexibilidade, estabilidade da poça e aos bons resultados que se podem alcançar com ele. Foi mostrado também que o desenvolvimento do PTA-P em termos de geração de tecnologia aplicável industrialmente demanda uma compreensão inter-disciplinar dos elementos técnico-científicos envolvidos, com estudos que vão desde sistemas de dosagem de particulados sólidos em pó até perfis termocinéticos do plasma e das partículas injetadas sob diferentes condições de soldagem. Ou seja, a formulação de procedimentos de soldagem para aplicações específicas não ter feito parte do escopo deste projeto, se geraram informações úteis para esta atividade.

Sendo assim, o grau de inovação do presente trabalho pode ser observado não somente pelo ponto de vista da concepção e viabilização de sistemas dedicados à tecnologia PTA-P (tocha de soldagem compacta, flexível e de fabricação facilitada; ADP-2 flexível e robusto, com câmara de fluidização; medição de vazão mássica de pó e horizonte para sistemas de monitoração online, calibração ou realimentação; pulsação de injeção de material em pó), mas também pela análise do comportamento do processo sob óticas até então pouco ou não abordadas, como soldagem fora da posição plana, diferentes misturas gasosas, manipulação do arco piloto para tocha de injeção externa e aplicação de diferentes granulometrias de um mesmo material.

De uma maneira geral, pôde-se averiguar que o PTA-P se trata de um processo viável, mas não linear. Ou seja, cada aplicação prevista deve ser precedida de um desenvolvimento dedicado, para que se alcance a qualidade realmente atingível pelo processo, pois as condições de deposição de material sofrem influência de diversos fatores, concomitantemente. Os principais fatos técnico-científicos conclusivos são:

- foi gerado o ADP-2, que se mostrou robusto sob diferentes solicitações e desempenho adequado ao longo de todo o trabalho. Vale citar o projeto do silo intercambiável, agilizando a recarga. Implementações continuam sendo realizadas, principalmente quanto à fabricação da câmara de fluidização e do projeto e seleção de materiais das superfícies em atrito. Suas desvantagens em relação ao tipo comercial de válvula rotativa são sobrepujadas por suas vantagens;

- a pulsação de material de aporte em pó mostrou influência sobre o resultado. De fato, quando a soldagem é pulsada (em baixa frequência) e a alimentação permanece constante, não há adequada fusão e deposição de material em uma das fases. Originou-se, portanto, uma necessidade de continuação de pesquisa;

- a medição de vazão mássica de pó online no processo PTA-P foi viabilizada. Como em qualquer processo de fabricação, a possibilidade de monitoração é uma necessidade. As características do fluxo demandaram um aparato de medição com um instrumento complexo e de relativa grande dimensão (um eletômetro emprestado do departamento de Eng. Elétrica da UFSC) para medição de muito baixas correntes. Desenvolvimentos serão necessárias para melhor adequação do sistema (maior simplicidade, menor tamanho, melhor resposta em diferentes faixas de vazão);

- a tocha de soldagem PTA-P viabiliza o processo, direcionando o pó adequadamente ao arco e à poça, e mantendo um arco rígido e com

adequada geometria e rigidez do arco, de modo que o pó se incorpore à poça metálica e que esta seja mantida e estabilizada. A tocha com injeção externa obteve resultados satisfatórios em soldagem e viabilizou operações em posições forçadas, o que, somado ao fato de ser mais compacta, foi selecionada em detrimento de uma tocha com injeção interna de pó. O novo modelo conceitualizado prevê maior simplicidade construtiva, operativa, com apenas um circuito de refrigeração;

- a aplicação da corrente pulsada traz benefícios metalúrgicos, (homogeneidade da composição química), mas também é acompanhada de outros efeitos de importância para o PTA-P, como alterações na penetração e diluição. Ademais, a dinâmica imposta ao plasma e, em consequência, às características de arraste e fusão das partículas de pó, impõe modificações na taxa de deposição. Como esta resposta do processo depende de propriedades físicas do plasma, ela deve ser verificada para diferentes gases de processo, de acordo com a aplicação. No presente trabalho, se verificou que, para taxa constante de alimentação, maiores frequências de pulsação resultam em redução da taxa de deposição;

- a corrente pulsada resulta em valores intermediários de taxa de deposição e geometria da solda, quando comparada à soldagem em corrente constante nos valores de pulso e base. Notou-se para as condições do ensaio uma dependência direta dos resultados da solda da corrente de soldagem;

- dentro das condições testadas, apesar de ter fomentado melhor homogeneidade de composição química no metal de solda, a técnica de tecimento não trouxe benefícios em relação à diluição da solda. Conclui-se que estes surgem a partir de valores mais altos de amplitude em combinação com maiores velocidades transversais da tocha;

- DBPs similares à distância focal dos jatos de pó resultou em alta eficiência de deposição, assim como resultados satisfatórios de diluição. Valores mais altos de DBP, mesmo que possam fomentar maior taxa de deposição para menores correntes, sofrem preponderância do decorrente aumento da potência de soldagem e aumento da diluição;

- a presença de um bico constritor, que reduz o diâmetro do arco deve ser considerada para o PTA-P como necessária para obtenção de boa rigidez do arco (baixa sensibilidade a desvios pelo gás de arraste ou outros desvios, que perturbariam todo o regime de transporte e fusão das partículas adicionadas) e adequados perfis de temperatura e viscosidade do plasma, que viabilizem a fusão, transporte e incorporação das partículas do pó à poça metálica, com eficiência de deposição satisfatória. Ou seja, a questão da alta concentração de energia deve ser visualizada de um ponto de vista diferente de outros processos de soldagem, como o

Plasma, que objetivam alta penetração e baixa largura da solda. Os ensaios do presente trabalho mostraram que um aumento da vazão do gás de plasma a um patamar próprio para soldagem keyhole, e conseqüente maior densidade de corrente, resulta em redução da taxa de deposição e turbulência da poça. Já para um dado aumento no diâmetro do orifício constritor (redução da concentração de energia), se nota baixa redução na taxa de deposição, mas redução apreciável da diluição, o que é desejável para o PTA-P. A atuação no recuo do eletrodo gerou respostas diferentes para diferentes correntes de soldagem (não linearidade do PTA-P), que modificam a taxa de deposição. A princípio, maiores recuos são apropriados;

- as soldas nas posições forçadas abordadas nos ensaios se permitiram realizar com maior facilidade e robustez na presença da técnica de tecimento. O modo pulsado (apenas corrente) não trouxe melhorias. Ao se utilizar o tecimento, no entanto, devem-se desenvolver procedimentos que evitem deterioração da diluição. Alterações na injeção de pó ao arco através da tocha, causadas pelas diferentes posições, não acarretaram problemas apreciáveis a soldagem;

- a análise da influência da técnica de manipulação da corrente do arco piloto na tentativa de se reduzir a diluição levou à verificação de fenômenos complexos quanto ao transporte e aquecimento do pó. Em dependência das combinações de correntes de arco principal, arco piloto e taxa de alimentação (a qual também interfere nos perfis das propriedades físicas do plasma), diferentes resultados de taxa de deposição, geometria da solda e diluição foram obtidos. Primeiramente, não se observaram resultados condizentes à literatura, o que certamente adveio do uso de tocha de injeção externa no presente trabalho. De maneira geral, pode-se concluir que não há aumento da taxa de deposição, para uma determinada taxa de alimentação, com aumento corrente do arco piloto, como o há para aumento da corrente do arco principal. Pelo contrário, se nota uma tendência a queda na taxa de deposição (desvio das partículas ou vaporização de parte destas) e aumento da diluição para maiores correntes do arco piloto (possivelmente resultantes da maior potência do mesmo, e de sua aproximação da poça);

- a utilização de He no gás de arraste resulta em visível menor depressão sobre a poça durante a soldagem, mas esse efeito é sobrepujado pela ação da maior potência atingida e maior condutividade térmica desse gás, resultando em maior diluição e maior molhabilidade. Já a utilização de N_2 não permitiu soldas isentas de porosidades, a não ser para aplicação conjunta de mistura de Ar e H_2 no gás de proteção e Ar e He no gás de plasma. A adição de H_2 , tanto no gás de proteção como no

gás de arraste, levou a uma esperada maior potência, maior molhabilidade e maior diluição, para taxas de deposição praticamente constantes. Em relação ao quesito estética da superfície do cordão (com menor oxidação), 10% de H₂ no gás de arraste obtiveram melhores resultados e a menor custo.

- as propriedades do pó metálico têm grande influência sobre sua escoabilidade e esta, sobre as condições de alimentação para o processo PTA-P. Para diferentes tipos de ADPs, diferentes valores da escoabilidade, ou sua ausência (pós não escoáveis), determinam diferentes regulagens do equipamento para uma desejada taxa de alimentação, ou a impossibilidade de alimentação. Sob soldagem, pós de baixa granulometria resultam em maior potência de soldagem e pronunciados maiores penetração e diluição, assim como de oxidação do metal de solda. Neste mesmo caso, também é notável a quantidade de fuligem depositada sobre a chapa e o cordão, fato que não acontece com pós de granulometria mais alta, adequada ao PTA-P.

Deste trabalho se originou o projeto de software e hardware de um sistema integrado para soldagem PTA-P (e seus componentes), com a compacticidade necessária para aplicações em ambientes de espaço e locomoção restritos, como os encontrados nos setores de Construção Naval, Petróleo e Gás e Geração de Energia. Trata-se de um equipamento baseado na plataforma computacional ARM, com entradas e saídas de comunicação que permitem o controle e comando dos diversos componentes do sistema, assim como possibilidade de interfaceamento com outros dispositivos de automação, como robôs. O software é em linguagem C e, devido à sua flexibilidade, pode ser alterado de acordo com necessidades emergentes. Isto é de total interesse em atividades de P&D. Mas o equipamento também deverá possuir a rigidez necessária para aplicações em ambiente industrial.

A possibilidade de fornecimento nacional de um sistema integrado para soldagem PTA-P resulta naturalmente em redução de custos e, além disso, num maior potencial de aproveitamento ótimo de suas funcionalidades e de contínuo aperfeiçoamento, pelo contato direto por parte dos usuários com os desenvolvedores do equipamento. Isto se torna ainda mais importante quando se leva em consideração a complexidade do processo e quando se objetiva ampliar sua introdução em outras aplicações, com diferentes materiais, sob diferentes condições.

6.1. Sugestões para trabalhos futuros

As conclusões acima justificam a continuidade dos trabalhos no processo PTA-P. De acordo com as aplicações em vista, são traçadas diretivas e sugestões para atividades futuras. Citam-se:

- P&D direcionado para melhoramentos no sistema de medição de vazão mássica de pó, com a finalidade de controle realimentado, controle de qualidade, calibração;

- P&D direcionado para melhoramentos no sistema de pulsação de pó e para verificação do impacto sobre a solda: testar a defasagem da pulsação do pó sob soldagem; melhoria do projeto eletro-mecânico da válvula direcionadora; tentativa de redução de peso da válvula, no intuito de acoplá-la à tocha; eliminação de vazamentos; verificação de benefícios em soldagem pulsada em posições forçadas; investigações metalúrgicas e estudo da resistência da camada depositada;

- Filmagem em alta velocidade, para verificação da trajetória e comportamento das partículas em sua viagem até a poça de fusão e sobre a mesma;

- P&D com diferentes materiais de aporte: testes com nanopartículas; misturas de pós atomizados (ou triturados) de diferentes granulometrias, na tentativa de manipulação da composição química do metal depositado; testes com cerâmicas; investigações metalúrgicas e estudo do desempenho da camada depositada;

- Alterações na tocha de soldagem: alimentações separadas e independentes para os orifícios inferiores e superiores; alimentação direta e independente para cada canal injetor, na tentativa de reduzir perda de energia cinética por atrito e colisões internas; projeto e avaliação de tocha com alimentação central de pó; mais orifícios injetores; botões de controle;

- Melhoramento do sistema de aquisição de dados, no sentido de que este se torne também um sistema de controle de qualidade online, dado o fato de que alguns defeitos durante o processo de soldagem são refletidos nas variáveis monitoradas;

- Verificação de possibilidade de benefícios provenientes do balanceamento da energia entre os dois arcos (piloto e principal) para a soldagem fora de posição;

- Estudos destinados à ampliação do conhecimento para soldagem com tochas de injeção interna de material em pó, como, por exemplo, acerca de seus resultados quando da manipulação do arco piloto;

- Verificação da possibilidade de favorecimento à soldagem em posições forçadas pela utilização de diferentes misturas nos gases do processo (alteração das propriedades físicas do plasma e da poça); investigações acerca das influências metalúrgicas e estudo do desempenho da camada depositada para diferentes combinações de composições químicas dos gases do processo;
- Estudos na aplicação do PTA-P para reparo de dutos em operação;
- Verificação da influência metalúrgica do arco não transferido em altas correntes, PTA-P Combinado, (ZAC, refino microestrutural).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] HONGYING, W. et al. **Investigation on the deposition rate and the dilution ratio of plasma surface welding.** China Welding, v.11, n.1, p.55-58, mai. 2002
- [2] **Welding-Related Expenditures and Productivity Measurement in U.S. Manufacturing, Construction, and Mining Industries.** AWS. 110 p., mai., 2002
- [3] **Gas Metal Arc Welding of Stainless Steel,** Praxair, 50 p., set. 1999
- [4] **Atlas da Energia Elétrica do Brasil.** ANEEL. 3ª Ed., 233 p.. Brasília, 2008
- [5] **Processo de Soldagem MIG/MAG Pulsado com Pulsação Térmica ou Duplamente Pulsado.** Carta Patente PI0004698-1, INPI, 13/03/2007
- [6] **Relatório Anual de Sustentabilidade.** TRACTEBEL ENERGIA. 150 p., 2007
- [7] **SINAVAL – Cenário 2009.** SINAVAL. 43 p., 26/03/2009
- [8] **Plano de Negócios 2009-2013.** Petrobrás. 26/01/2009
- [9] DÍAZ, V. M. V., **Inovação do Equipamento e Avaliação do Processo Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó (PTAP) para Soldagem Fora de Posição.** 2005, 198 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis
- [10] DEUIS, R. L. et al. **Metal-matrix composite coatings by PTA surfacing.** Composites Science and Technology, v.58, n. 2, p. 299-309, 1998
- [11] MARCONI, M.; MARCONI, B. **Powder Plasma Arc Welding on Thick Walled Pipes.** International Institute of Welding , 16 p., Paper 11. 2005.
- [12] FAUCHAIS, P.; VARDELLE, A. **Thermal Plasmas.** IEEE Transactions on Plasma Science, v.25, n.6, dez. 1997
- [13] EST. DAIDO Steel. 6 p.
- [14] **PTA Welding Systems.** ISOTEC, 24 p., set./2001
- [15] FÜSSEL, U. **Lichtbogentechnologie zum Fügen – noch nicht ausgeschöpfte und nicht erkannte Potentiale.** Artigo do DFK (Dresdner Fügetechnisches Kolloquium) 2006, 9 p.. Dresden, mar. 2006
- [16] 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.

- [17] 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
- [18] KABATNIK, L. **Plasma-Pulver-Schweißen Verschleißbeständiger Schichten auf Aluminiumwerkstoffe.** 2002. 128 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Rheinisch-Westfälisch Technisch Hochschule Aachen
- [19] SUN, Z.; HUANG, Z.H. **Micro-PTA powder cladding on a hot work tool steel.** Int. J. of Materials and Product Technology, v.13, ns. 3-6, p. 146-154, 1998
- [20] DOLLES, M. **Untersuchungen zur Verfahrenskombination Laser-Plasma-Auftragschweißen.** 2002. 160 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Diplomarbeit) (Engenharia Mecânica) – Fachhochschule Amberg-Weiden
- [21] Arcraft Plasma website. Disponível em www.arcraftplasma.com. Acesso em mar. 2009
- [22] DILTHEY, U.; KABATNIK, L. **Zentrale Pulverzufuhr beim Plasma-Pulverauftragschweissen.** Schweissen & Schneiden, n. 12, p. 766-771. Düsseldorf, dez. 1998
- [23] GEBERT, A. et al. **Plasma-Pulver-Auftragschweissen.** Oberflächentechnik, n.1, p. 56-60. München, 1996
- [24] DRAUGELATES, U. et al. **Surfacing with Combinations of Wire and Powder for Producing Hard Material-reinforced Wear Resistant Layers.** Welding and Cutting, n. 4, p. 39-41. Düsseldorf, abr. 1995
- [25] WAHL, W.; KRAUSKOPF, F. **Plasma-arc Powder Surfacing of Ferrous Materials.** Welding and Cutting, n. 2, p. 15-16. Düsseldorf, fev. 1993
- [26] GEBERT, A. et al. **Verlängerung der Standzeit von Messern und Verschleissleisten durch Plasma-Pulver-Auftragschweissen von hochkarbidhaltigen Eisenwerkstoffen.** Wochenblatt für Papierfabrikation, n. 19, p. 946-949. 1998
- [27] BEWLEY, J.G. **Plasma-transferred-arc Wearfacing.** Tooling & Production, p. 54-55. dez. 1980
- [28] SHUBERT, G. **Wearsurfacing with PTA: Tips for the First-time User.** Tooling & Production, p. 60-61. nov. 1984
- [29] DESIR, J.L. **Plasma Arc Coatings Combat Component Wear.** Welding and Metal Fabrication, p. 219-222. jun. 1983
- [30] XIBAO, W.; WENYUE, Z. **The Theoretical Evaluation of Powders Transportation in Plasma Transferred-arc Space**

- under Coaxial Powder Feeding Condition.** China Welding, v.10, n.2, p. 104-110. nov. 2001
- [31] 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
- [32] Deloro Stellite website. Disponível em www.stellite.com. Acesso em mar. 2009.
- [33] PEKAREK, M., **Eutronic GAP Plasma Schweißtechnik.** Apresentação no DFK (Dresdner Fügetechnisches Kolloquium) 2006. 19 p.. Dresden, mar. 2006
- [34] Cosima website. Disponível em www.cosima.com. Acesso em mar. 2009
- [35] PAVLENKO, A. **Neue Kenntnisse über Physikalische Grundlagen des Plasma-Pulver-Auftragschweißens als Basis für die Prozeßsteuerung.** 1996. 118 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Rheinisch-Westfälisch Technisch Technische Hochschule Aachen
- [36] MATSUDA, F. et al. **Formation of Thicker Hard Alloy Layer on Surface of Aluminum Alloy by PTA Overlaying with Metal Powder.** Transactions of JWRI, Welding Research Institute of Osaka University, v.20, n.1, p. 89. Osaka, 1991
- [37] 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
- [38] BEWLEY, J.G. High Production Hard Surfacing with Versatile Metal Powders. Welding Design & Fabrication. p. 70-71. abr. 1978
- [39] MILLIGAN, J.; NARASIMHAN, S. **A Powder Fed Plasma Transferred Arc Process for Hard Facing Internal Combustion Engine Valve Seats.** SAE Technical Paper Series, Congress and Exposition Cobo Hall, 12 p. Detroit, fev. 1980
- [40] SOM, A. I. **New Plasma Torches for PTA-surfacing.** Artigo disponível em www.plasma-master.com.ua. Acesso em fev. 2006
- [41] KIM, H.-J; KIM, Y.J. **Wear and Corrosion Resistance of PTA Weld Surfaced Ni and Co Based Alloy Layers.** Surface Engineering, v.15, n.6, p. 495-501. 1999
- [42] MATTHES, K., KHALED, A. **Formgebendes Plasma-Pulver-Auftragschweißen mit Impulslichtbogen unter Beachtung Minimaler Verformung.** Schweißen & Schneiden, n. 9, p. 668-672. Düsseldorf, set. 1996

- [43] DRAUGELATES, U.; BOUAIFI, B.; SCHULTZE, S. **Hochleistungs-Plasmapulverauftragschweißen mit Duplexstählen**. Schweissen & Schneiden, n. 5, p. 245-251. Düsseldorf, mai. 1999
- [44] GLYNN, T. **Plasma Transferred Arc and HVOF Hardfacing Processes**. Apresentação à AWS. 2007
- [45] COMMERSALD website. Disponível em www.commersald.com. Acesso em mar. 2009
- [46] D'OLIVEIRA, A. S. C. M.; PAREDES, R.S.C.; SANTOS, R. L. C. **Pulsed Current Plasma Transferred Arc Hardfacing**. Journal of Materials Processing Technology, v. 171, n. 2, p. 167-174. jan. 2006
- [47] BOND, D.; OKIMOTO, P. C.; D'OLIVEIRA, A. S. C. M. **Efeito da Intensidade de Corrente nas Características de Revestimentos Soldados com Material de Adição Atomizado**. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação III COBEF. Joinville, 2005
- [48] YAEDU, A.E; D'OLIVEIRA, A.S.C.M. **Cobalt Based Alloy PTA Hardfacing on Different Substrate Steels**. Materials Science and Technology, v.21, n.4, p. 459-466. 2005
- [49] 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
- [50] 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
- [51] ZHAO, C. et al. **Non-transferred Arc Plasma Cladding of Stellite Ni60 Alloy on Steel**. Surface and Coatings Technology, v.155, n. 1, p. 80-84. jun. 2002
- [52] MATSUDA, F. et al. **Carbide Addition on Aluminium Alloy Surface by Plasma Transferred Arc Welding Process**. Transactions of JWRI, Welding Research Institute of Osaka University, v.19, n.2, p. 241-247. Osaka, 1990
- [53] DELGADO, L. C. **Estudo e Desenvolvimento do Processo TIG com Alimentação Automática de Arame**. 2000. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina
- [54] OLIVEIRA, M. A. **Estudo da Soldagem Plasma com Alimentação Automática de Arame para Aplicação em Revestimentos Metálicos**. 2001. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina

- [55] KNOTEK, O.; SCHREY, A. **Corrosion, Erosion and Protection of Welded Structures**. *Welding in the World*, v.32, p. 10-16. 1993
- [56] KLIMPEL, A. et al. **The Study of the Technology of Laser and Plasma Surfacing of Engine Valves Face made of X40CrSiMo10-2 Steel Using Cobalt-based Powders**. *Journal of Materials Processing Technology*, 6 p.. 2005
- [57] WHITE, R.A.; ANGELIU, T.M. **Evaluating the SCC Resistance of Underwater Welds in Sodium Tetrathionate**. *NACE International Corrosion 97*, Paper n. 98. 12 p.. 1997
- [58] FENG, Z. et al. **Development of Compressive Residual Stresses in Underwater PTA Welds**. *GE Research & Development Center Technical Information Series*. ago. 1999
- [59] WHITE, R. A., et al. **Underwater Welding with Laser and Plasma Arc Welding**. *Welding Journal*, v. 76, n. 1, p. 57-61. Miami, jan. 1997
- [60] KHASANOV, E. Z., et al. **Powder Feeder - has Compensating Duct Made with Openings for Gas Release and Equipped with Valve**. Patente n. SU1388227-A. ISI. 1988
- [61] HALLEN, H. et al. **Plasma Transferred Arc Surfacing with High Deposition Rates**. *Proceedings of the 4th National Thermal Spray Conference*. p. 537-539. Pittsburg, mai. 1991
- [62] TUR, M. **Method for Plasma Transferred Arc Welding**. Depósito de patente n. 8903522.4. UK Patent Office, ago. 1990
- [63] **New Generation of Plasma Welding Torches**. *Informação de Imprensa da TBi. Welding and Cutting*, n. 3, p. 130-131. Düsseldorf, mar. 2007
- [64] WHITE, R. A.; SOLOMON, H. D. **Water Exclusion Device for Underwater Welding**. Patente n. 5,750,954. USPTO. 12/05/1998
- [65] **Kognitionsorientierter modularer und autonomer Service-Roboter zur vor Ort Instandsetzung von Tiefzieh- und Spritzgusswerkzeugen in wechselnden Kontexten (KomoRob)**. Relatório Final de Projeto
- [66] SIDOROV, A.I. **Altering the Design of the Anode of a Plasma Torch to Increase the Efficiency of Deposition (to Reduce Gas Consumption)**. *Svar. Proiz.*, n.6, p. 17-18. 1978
- [67] BOELLINGHAUS, T.; SCHOBBER, H. **Nd: YAG Laser Plasma Powder Hybrid Welding of Austenitic Stainless Steels**. *6th International Trends in Welding Research Conference Proceedings*. p. 453-458. Pine Mountain, 2003
- [68] SCHNICK, M. et al. **Simulation von Plasmalichtbögen**. *Artigo do DFK 2006*, 10 p.. Dresden, mar. 2006

- [69] SCHNICK, M. et al. **Der Lichtbogen in der Prozesssimulation- die realen Möglichkeiten zum Beispiel für die Brennerentwicklung.** Apresentação em Seminário no SLV München. 33 p.. Munique, 27/03/2007
- [70] **Robotic PTA System Increases Hardfacing Productivity.** Welding Journal, v. 75, n. 2, p. 51-53. Miami, fev. 1996
- [71] GOMIDE, R., **Operações Unitárias**, v.1 Operações com Sistemas Sólidos Granulares, 1ª edição. Ed. do Autor. 1980
- [72] **GTV – Powder Feeder Series PF – Prospecto GTV**
- [73] STEEN, W. et al. **Screw Powder Feeders.** Depósito de Patente n. PCT/GB85/00456. European Patent Office, 11/10/1985
- [74] STAND, M., STREICHER, A. H. **Pulverzufördervorrichtung.** Depósito de Patente n. 2144871. Deutsches Patentamt. 15/03/1973
- [75] BOHORQUEZ, C. E. N. **Relatório de Ensaios da Taxa de Alimentação de Pó.** Relatório Interno LABSOLDA, 8 p.. Florianópolis, 26/06/2008
- [76] UCHIDA, K.; OKAMOTO, K. **Measurement of Powder Flow in a Screw Feeder by X-ray Penetration Image Analysis.** Measurement Science and Technology, v.17, n. 2, p. 419-426. fev. 2006
- [77] SPIVANOVSKY, A. et al. **Conveyors and Related Equipment.** Peace Publishers. 444 p. Moscou, 1970
- [78] FAROLDI, B. **Device for Plasma Welding Having a Powder Dosing Member Acting by Gravity Fall.** Depósito de Patente n. PCT/EP96/01707. European Patent Office, 23/04/1996
- [79] **Drum Feeder for Introducing Powder into a Plasma Jet.** Patente n. SU266111-A. ISI Web of Knowledge
- [80] **PM- PF-10 Operating Manual.** Plasma Master. 6 p.
- [81] VSEVOLODOV, B. A.; SEMENOV, S. A.; MILBUD, S. R. **Powder Feeder - has Body Equipped with Sleeve Having Inclined Axial Opening and Groove on Cylindrical Surface.** Patente n. SU1493417-A. ISI Web of Knowledge. 15/7/1989
- [82] DECHSIRI, C. **Particle Transport in Fluidized Beds.** 2004. 177 f. Tese (Doutorado) – Universidade de Groningen
- [83] CHASE, G. G. **Solids Notes.** Universidade de Akron. p. 5.1-5.11
- [84] SOBRAL, Y. D. **Estabilidade Hidrodinâmica e Magnética de Leitos fluidizados.** 2004. 321 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de Brasília
- [85] XIBAO, W. et al. **The Powder's Thermal Behavior on the Surface of the Melting Pool During PTA Powder Surfacing.**

- Surface and Coatings Technology, v. 201, n. 6, p. 2648-2654. dez. 2006
- [86] DILTNEY, U. et al. **Kombiniertes Plasma-Pulver-Auftragschweißen. Schweißen und Schneiden**, n. 5, p. 241-244. mai. 1993
- [87] KABATNIK, L., GIESSLER, S. **Plasma Torch, Especially a Plasma Positive Pole Torch**. Patente n. WO200226005-A1. European Patent Office. 28/03/2002
- [88] STELLING, K. et al. **Qualification of Nd:YAG and CO2 Laser Plasma Hybrid Welding with Filler Material Powder**. Welding and Cutting, n. 6, p. 330-334. jun. 2006
- [89] HOLLER, K. et al. **Vertical-up and -down Laser Plasma Powder Hybrid Welding of a High Nitrogen Austenitic Stainless Steel**. International Institute of Welding IIW Doc. n. IX-2108-04
- [90] GONÇALVES e SILVA; R. H.; 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
- [91] KNOPP, N.; KILLING, R. **WIG-Schweißen mit Impulsen im höheren Frequenzbereich**. EWM Schweisstechnischeswissen. set. 2002
- [92] CORREA, M. A., **Diretrizes de Projeto e Qualificação Metrológica de Sistemas de Medição de Grandezas Elétricas em Processos de Soldagem a Arco**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina
- [93] SCHREIBER, F. et al **Vollmechanisiertes PTA-Auftragschweißen in Zwangslage an Bauteilen Komplexer Geometrie**. 5. Fachtagung SLV Halle. Halle, 2004
- [94] **PTA POWDER** – Prospecto Cogne Technologies
- [95] ZÄHR, J. et al. **Numerical Investigations of Process Gases and their Influence on TIG Welding**. TU Dresden, 2009
- [96] **Standard Test Method for Flow Rate of Metal Powders ASTM B 213 97**. ASTM
- [97] STELLING, K. **Laserstrahl-Plasma-Hybridschweißen Austenitischer Stähle**. 2008. 135 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Técnica de Berlin
- [98] van DIJK, J. **Internship at LABSOLDA**. Relatório de Estágio (em inglês). Florianópolis, ago. 2009
- [99] ISAKOV, F. Y. et al. **Flowmeter for Loose Materials**. Measurement Techniques, v. 22, n. 10, p. 1233-1235. out. 1979

- (Translated from Izmeritel'naya Tekhnika, n. 10, p. 50–51. out. 1979)
- [100] MATSUSAKA, S., MASUDA, H. **Simultaneous Measurement of Mass Flowrate and Charge-to-mass Ratio of Particles in Gas-solids Pipe Flow**. Chemical Engineering Science, v. 61, n. 7, p. 2254-2261. abr. 2006
- [101] SCHNICK, M. et. al. **Numerical Investigations of the Influence of Design Parameters, Gas Composition and Electric Current in Plasma Arc Welding (PAW)**. TU Dresden. Dresden, dez. 2009
- [102] BOUAIFI, B. et. al. **Nutzung von Stickstoffhaltigen Hochtemperaturplasmen zum Reaktiven Beschichten mittels Plasmaauftragschweißen**. Schweissen und Schneiden, n. 8, p. 478-482. ago. 2001
- [103] BUSCHINELLI, A. J. A., **Atividades do Grupo METSOLDA no Desenvolvimento do Projeto PTA-P – Desenvolvimento de Ligas Resistentes à Cavitação – Notas METSOLDA II**. Comunicação Interna LABSOLDA. set. 2008