

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

**INOVAÇÃO DO EQUIPAMENTO E AVALIAÇÃO DO
PROCESSO PLASMA DE ARCO TRANSFERIDO
ALIMENTADO COM PÓ (PTAP) PARA SOLDAGEM
FORA DE POSIÇÃO**

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

VÍCTOR MANUEL VERGARA DÍAZ

FLORIANÓPOLIS – SC, FEVEREIRO DE 2005

VÍCTOR MANUEL VERGARA DÍAZ

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de

DOUTOR EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA

sendo aprovada em sua forma final.

Prof. Dr. Jair Carlos Dutra
Orientador

Profa. Ph.D. Ana Sofia C. M. de Oliveira
Co-orientadora

Prof. Dr. José Antônio Bellini da Cunha Neto
Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Augusto José de Almeida Buschinelli
Membro

Prof. Ph.D. Amérco Scotti
Membro

Prof. Dr. Ramón Sigifredo Cortés Paredes
Membro

Prof. Dr. Berend Snoeijer
Membro

“Yo creía que la ruta pasaba por el hombre, y que de allí tenía que salir el destino”.

Pablo Neruda

Aos meus pais, Luz e Edmundo.

Aos meus irmãos Edmundo, Bernardino, Jorge, Gastón e Rafael

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Jair Carlos Dutra, pela orientação e estímulo;

A minha co-orientadora Prof. Ana Sofia, pela co-orientação e contribuição para o meu aperfeiçoamento;

Ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC, pela oportunidade de realizar este trabalho;

À Universidade de Antofagasta pelo apoio financeiro;

A Luis Galaz e família pela amizade e convivência;

Ao bolsista Tiago Álvares, pelo trabalho desenvolvido referente a projeto dos equipamentos e na realização dos experimentos;

Ao bolsista Marcus Barnetche pelo apoio na área de projeto e montagem dos equipamentos;

Ao bolsista Guilherme Fantin pelo apoio na parte de projeto e realização dos experimentos;

Ao Prof. Buschinelli, Cleide Márquez e Bruno Ventura pela realização dos ensaios de cavitação;

Ao Prof. Carlos Niño, pelas suas contribuições a este trabalho;

Aos Eng^{os} Raul Gohr Jr, Túlio Fernandes, Moises Oliveira, Régis Gonçalves e Carlos Broering pelo valioso apoio e colaboração;

Ao Eng. Larry Fiori Ollé, pelas contribuições neste trabalho (*In Memorium*);

Ao técnico Vladimir Fortunato pela ajuda no trabalho prático.

À equipe do LabMats/UFPR, Ricardo e Rodrigo pelo apoio na realização dos experimentos;

À toda a turma de LABSOLDA, em especial aos amigos Luciane Kunz, Tiago Vieira, Guilherme Locatelli, Nelso Gauze, Fernando Abdalla, Alexandre Weingartner, Frederico José de Souza Filho, Fabiano Serenza, Jorge Rafael dos Santos, Janaina Basílio, Annelise Anderson, Eder Rodriguez, Felipe Valente, Carlos Martins, Billy Alceu de Abreu, Renan Corrêa, Leonardo Weck, Fabiano Tristão, Marcelo Okuyama, Guber Guerrero; Jaime Villanueva; Nilceu Novick; Ricardo Bermano; Wilson Tafur.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOGIA	xix
RESUMO	xxii
ABSTRACT	xxiii
1 INTRODUÇÃO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	1
2 CONHECIMENTOS FUNDAMENTAIS E FATOS PRECURSORES	5
2.1 Introdução	5
2.2 Processo de soldagem por plasma	5
2.3 Influência das condições de processo	14
2.3.1 Recuo do eletrodo	14
2.3.2 Diâmetro do orifício constritor	15
2.3.3 Distância bico-peça, DBP	15
2.3.4 Corrente de soldagem	16
2.3.5 Características e taxa de alimentação de pó	19
2.3.6 Influência do nível e concentração de energia	19
2.3.7 Influência do tipo de material de aporte	20
2.3.8 Características e vazões dos gases empregado no processo	20
2.4 Aplicações atuais do processo PTAP	23
3 MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1 Introdução	25
3.2 Bancada de ensaios	25
3.2.1 Central de soldagem INVERSAL 450/600	26
3.2.2 Módulo Plasma	27
3.2.3 Medidores de Vazão de gás MVG-1	27
3.2.4 Controlador de vazão de Gás de plasma	27
3.2.5 Software	27
3.2.6 Placa de aquisição INTERDATA	28

3.2.7 Sistema de deslocamento da tocha de soldagem TARTÍLOPE V1 E TARTÍLOPE V2	28
3.2.8 Tocha de soldagem Plasma marca Thermal Dynamics modelo PWM-300	28
3.2.9 Alimentador de pó (ADP)	28
3.3 Materiais	28
3.3.1 Corpos de prova	28
3.3.2 Material de aporte	29
3.3.3 Gases	31
3.3.4 Eletrodo	31
3.4 Metodologia experimental	31
3.4.1 Análise geométrica das amostras	31
3.4.2 Preparação das amostras para exame metalográfico	32
3.4.3 Ajuste da tocha de soldagem	33
3.4.4 Posicionamento da tocha de soldagem	33
3.4.5 Ajuste da distância bico-peça	34
3.4.6 Padrão de aceitação	34
3.4.7 Determinação do grau de diluição	34
3.4.8 Perfil de microdureza	35
3.4.9 Espaçamento dos braços dendríticos (ASTM E-112)	36
3.4.10 Resistência dos depósitos Stellite 6 ao desgaste por deslizamento	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1 Equipamentos	37
4.1.1 Testes de desempenho da tocha adaptada	37
4.1.2 Testes de desempenho do alimentador de pó (ADP)	49
4.2 Procedimentos na posição plana	62
4.2.1 Análise da influência da vazão do gás de arraste sobre o arco voltaico	62
4.2.2 Determinação do rendimento de deposição	73
4.2.3 Análise da influência do recuo do eletrodo e da distância bico-peça (DBP)	85
4.2.4 Análise da influência da vazão de gás de plasma	91
4.2.5 Análise da influência da velocidade de soldagem	102
4.2.6 Análise da influência da corrente de soldagem	110

4.2.7 Análise da influência da corrente contínua pulsada	120
4.2.8 Análise da influência da técnica da oscilação da tocha (tecimento) sobre as características do depósito	136
4.2.9 Efeito do tipo de corrente (corrente contínua constante e corrente contínua pulsada) sobre a resistência à cavitação	145
4.3 Desempenho do processo na posição horizontal e sobre-cabeça	152
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	170
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	173

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO 2

Figura 2.1 – Comparação dos processos Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó- PTAP e Plasma de Arco Transferido Alimentado com arame- PTAA	6
Figura 2.2 – Esquema do alimentador de pó	7
Figura 2.3 - Sistema Alimentador de Pó (PLASMA TEAM, 2004)	8
Figura 2.4 – Esquema alimentador de pó (DURUM, 2004)	9
Figura 2.5 – Aparelho alimentador de pó (COMMERSALD, 2004)	9
Figura 2.6 – Tocha plasma e sistema alimentador de pó, produzido pela Deloro Stellite	10
Figura 2.7 – Tocha de soldagem e esquema de funcionamento (PLASMA TEAM, 2004)	11
Figura 2.8 – Tocha de soldagem (COMMERSALD, 2004)	11
Figura 2.9 – Distância Bico-Peça (DBP) e Recuo do Eletrodo (Rc)	12
Figura 2.10 – Representação esquemática do arco piloto e do arco transferido	13
Figura 2.11 – Influência do fator recuo do eletrodo sobre o grau de constrição do arco	14
Figura 2.12 – Efeito da diluição em função da corrente, taxa de deposição e distância bico-peça	16
Figura 2.13 – Diluição obtida em função da corrente, taxa de deposição e vazão de gás de plasma	17
Figura 2.14 – Variáveis da corrente contínua pulsada	18
Figura 2.15 – Relação entre a taxa de alimentação de pó e taxa de gás de transporte	21
Figura 2.16 – Oscilador magnético adaptado na tocha para o Processo TIG Alimentado	23

CAPITULO 3

Figura 3.1 – Montagem da bancada no laboratório de soldagem LABSOLDA	26
Figura 3.2 – Granulometria do pó depositado pelo processo PTAP - Stellite 6, 45 a 150 μ m	30
Figura 3.3 – Morfologia do pó depositado pelo processo PTAP - Stellite 6, 45 a 150 μ m	31
Figura 3.4 – Dimensões geométricas do cordão de solda	32
Figura 3.5 – Visão geral do posicionamento da tocha de soldagem	34
Figura 3.6 – Determinação do grau de diluição. Tela do software comercial. Seção	

transversal de um dos revestimentos depositados por PTAP	35
Figura 3.7 – Esquema da seção transversal do cordão, indicando a localização das impressões de microdureza	35
Figura 3.8 – Corpo de prova mostrando a região de onde foram retirados os pinos	36
CAPITULO 4	
Figura 4.1 – Tocha PMW-300 da Thermal Dynamics existente no laboratório	38
Figura 4.2 – Modelo gerado em ambiente CAD da tocha plasma adaptada PTAP.	38
Figura 4.3 – Seção transversal da tocha adaptada	39
Figura 4.4 – Montagem tocha PTAP desenvolvida pelo Labsolda	39
Figura 4.5 – Tocha PMW-300 existente no laboratório	40
Figura 4.6 – Tocha adaptada Processo PTAP	40
Figura 4.7 – a) Modelo do bico constritor gerado em CAD, b) e c) Fotografia do bico constritor fabricado	41
Figura 4.8 – Corte transversal do bico constritor de 30° e bico constritor de 60° projetados no LABSOLDA	43
Figura 4.9 – Pontos de intersecção arame/arco	44
Figura 4.10 – Modelo do porta-bico gerado em CAD, b) Porta bico fabricado	45
Figura 4.11 – Fotografia do Bocal do Gás de Proteção fabricado	46
Figura 4.12 – Fotografia da Tampa do Gás de Proteção fabricada	46
Figura 4.13 – Teste de abertura do Arco Piloto	47
Figura 4.14 – Teste de abertura do Arco Principal	48
Figura 4.15 – Montagem do equipamento para a medição da temperatura na tocha	48
Figura 4.16 – Esquema do alimentador de pó desenvolvido neste trabalho	49
Figura 4.17 – Modelo do Alimentador de Pó gerado em ambiente CAD	51
Figura 4.18 – Montagem do Alimentador de Pó desenvolvido pelo Labsolda	51
Figura 4.19 – Rolamentos, vedações e motor selecionados. Fuso transportador fabricado	52
Figura 4.20 – Fuso transportador. Passo=10 mm	54
Figura 4.21 – Fuso transportador. Passo=4mm	54
Figura 4.22 – Função de transferência correspondente ao fuso de passo $p=10\text{mm}$	55
Figura 4.23 – Função de transferência correspondente ao fuso de passo $p=4\text{mm}$	55
Figura 4.24 – Alimentador de Pó em vista explodida	56
Figura 4.25 – Aspecto visual do depósito. Fuso transportador com $p=10\text{ mm}$	58

Figura 4.26 – Aspecto visual do depósito. Fuso transportador $p=4$ mm	60
Figura 4.27 – Relação entre a taxa de deposição e o gás de transporte	61
Figura 4.28 – Efeito da ação dos fluxos do gás de arraste sobre o arco piloto	65
Figura 4.29 – Diagrama dos gases utilizados no processo. Gás de arraste, pressurização, plasma e proteção	65
Figura 4.30 – Diagrama do ciclo de soldagem	66
Figura 4.31 – Comportamento da tensão do arco em função do gás de arraste	67
Figura 4.32 – a) Fluxo do gás de arraste localizado no plano OXZ. Direção de soldagem perpendicular ao plano OXZ. b) Aspecto superficial dos cordões. c) Seções transversais dos cordões	69
Figura 4.33 – a) Velocidade de soldagem paralela ao plano OXZ. Orifícios do fluxo de gás de arraste alinhados em relação à velocidade de soldagem	70
Figura 4.34 – Efeito do gás de arraste sobre o arco plasma utilizando um único condúite de alimentação de pó	71
Figura 4.35 – Registro fotográfico que mostra o efeito do gás de arraste sobre o arco plasma utilizando um único condúite de alimentação de pó	71
Figura 4.36 – Aspecto superficial. $I = 120$ A, $V_s = 8$ cm/min, $T_x = 0,5$ kg/h $\delta = 11,5$ %	72
Figura 4.37 – Aspecto superficial. $I = 130$ A, $V_s = 8$ cm/min, $T_x = 0,5$ kg/h $\delta = 22$ %	72
Figura 4.38 – Fotografia que mostra a dispersão de partículas	73
Figura 4.39 – Montagem dos corpos inicio, regime e fim	75
Figura 4.40 – (a). Montagem dos corpos de prova (b). Corpo de prova “regime” desmontado, pronto para ser pesado	76
Figura 4.41 – Rendimento de deposição	77
Figura 4.42 – Corte transversal dos bicos constritores mostrando a entrada do fluxo de pó no arco plasma	80
Figura 4.43 – Aspecto do cordão para um bico constritor de 30° . $V_s = 20$ cm/min	81
Figura 4.44 – Aspecto do cordão para um bico constritor de 60° . $V_s = 20$ cm/min	82
Figura 4.45 – Aspecto do revestimento para um bico constritor de 30° . $V_s = 12$ cm/min	83
Figura 4.46 – Aspecto do revestimento obtido com um bico constritor de 60° . $V_s = 20$ cm/min	84
Figura 4.47 – Efeito do recuo do eletrodo sobre o aspecto geométrico dos depósitos com	

PTAP usando $I = 170$ A, $V_s = 20$ cm/min e $T_x = 1,17$ kg/h. Bico constritor de 30°	87
Figura 4.48 – Efeito do recuo do eletrodo sobre o aspecto geométrico dos depósitos com PTAP usando $I = 170$ A, $V_s = 20$ cm/min e $T_x = 1,17$ kg/h. Bico constritor de 60°	87
Figura 4.49 – Seção transversal dos cordões para uma DBP= 6 mm	88
Figura 4.50 – Seção transversal dos cordões para uma DBP=10 mm	88
Figura 4.51 – Condições geométricas dos depósitos em função da distância bico-peça (DBP)	89
Figura 4.52 – Efeito do fator distância bico-peça na tensão do arco	89
Figura 4.53 – Efeito da distância bico-peça (DBP) sobre o grau de diluição	90
Figura 4.54 – Seção transversal dos cordões para uma DBP= 6 mm. Bico constritor de 30°	90
Figura 4.55 – Aspecto superficial dos depósitos de Stellite 6 depositados por: a) PTAA b) PTAP	93
Figura 4.56 – Seção transversal dos cordões – Processo PTAA	93
Figura 4.57 – Seção transversal dos cordões – Processo PTAP	94
Figura 4.58 – Efeito da vazão de gás de plasma sobre o grau de diluição no processo PTAA e PTAP	95
Figura 4.59 – Efeito da vazão de gás de plasma sobre os parâmetros geométricos	95
Figura 4.60 – Micrografias das amostras de Stellite 6 para o Processo PTAA e PTAP. VGP=3,0 (l/min)	97
Figura 4.61 – Micrografias das amostras de Stellite 6 para o Processo PTAA e PTAP. VGP=2,4 (l/min)	98
Figura 4.62 – Micrografias das amostras de Stellite 6 para o Processo PTAA e PTAP. VGP=2,2 (l/min)	99
Figura 4.63 – Espaçamento dos braços dendríticos no centro dos depósitos. Comparação entre o processo PTAA e PTAP para três níveis de vazão de gás de plasma	100
Figura 4.64 – Efeito da vazão de gás de plasma sobre a dureza no processo PTAA	100
Figura 4.65 – Efeito da vazão de gás de plasma sobre a dureza no processo PTAP	101
Figura 4.66 – Seção transversal dos cordões para um bico de 30°	103
Figura 4.67 – Seção transversal dos cordões para um bico de 60°	103
Figura 4.68 – Aspecto do cordão para uma $V_s=10$ cm/min, bico 60°	105
Figura 4.69 – Aspecto do cordão para uma $V_s=15$ cm/min, bico 60°	106
Figura 4.70 – Cordão realizado sobre chapa de 230x130x12,5 mm	106

Figura 4.71 – Efeito do fator velocidade de soldagem sobre os parâmetros geométricos do cordão de solda	107
Figura 4.72 – Efeito do fator velocidade de soldagem sobre o grau de diluição	108
Figura 4.73 – Efeito da velocidade de soldagem sobre a dureza, com bico constritor de 30°	109
Figura 4.74 – Efeito da velocidade de soldagem sobre a dureza, com bico constritor de 60°	109
Figura 4.75 – Aspecto da seção transversal do cordão obtido no processo PTAP e PTAA: coluna da esquerda, com taxa de deposição de 1,17 kg/h; coluna da direita, com taxa de deposição de 1,5 kg/h. Todos efetuados com 160 A	114
Figura 4.76 – Condições geométricas dos depósitos-Processo PTAP-Bico constritor de 30°	115
Figura 4.77 – Condições geométricas dos depósitos-Processo PTAP-Bico constritor de 60°	115
Figura 4.78 – Grau de diluição em função da corrente, taxa de deposição e bico constritor	116
Figura 4.79 – Efeito do fator corrente de soldagem sobre a dureza com bico constritor 30°	116
Figura 4.80 – Efeito do fator corrente de soldagem sobre a dureza com bico constritor 30°	117
Figura 4.81 – Efeito do fator corrente de soldagem sobre a dureza com bico constritor 60°	117
Figura 4.82 – Efeito do fator corrente de soldagem sobre a dureza com bico constritor 60°	118
Figura 4.83 – Condições geométricas dos depósitos-Processo PTAA	119
Figura 4.84 – Grau de diluição em função da corrente e taxa de deposição – Processo PTAA	119
Figura 4.85 – Aspecto superficial dos depósitos de Stellite 6. Bico 60.	123
Figura 4.86 – Seção transversal dos cordões. Bico 60	124
Figura 4.87 – Seção transversal dos cordões. Bico 30	125
Figura 4.88 – Condições geométricas dos depósitos em função da modulação de corrente e tipo de bico constritor	126
Figura 4.89 – Grau de diluição em função da modulação de corrente e tipo de bico	

constritor	126
Figura 4.90 – Micrografias das amostras de Stellite 6 junto à superfície. Bico 30. Corrente contínua pulsada $f=5$ Hz; b) Corrente contínua pulsada $f=2,5$ Hz; c) Corrente contínua constante	127
Figura 4.91 – Micrografias da região de ligação substrato-depósito. Bico 30. a) Corrente contínua pulsada $f=5$ Hz; b) Corrente contínua pulsada $f=2,5$ Hz; c) Corrente contínua constante	128
Figura 4.92 – Micrografias da região do centro do depósito. Bico 30. a) Corrente contínua pulsada $f=5$ Hz; b) Corrente contínua pulsada $f=2,5$ Hz; c) Corrente contínua constante	129
Figura 4.93 – Micrografias das amostras de Stellite 6 junto à superfície. Bico 60. a) Corrente contínua pulsada $f=5$ Hz; b) Corrente contínua pulsada $f=2,5$ Hz; c) Corrente contínua constante	130
Figura 4.94 – Micrografias da região de ligação substrato-depósito. Bico 60. a) Corrente contínua pulsada $f=5$ Hz; b) Corrente contínua pulsada $f=2,5$ Hz; c) Corrente contínua constante	131
Figura 4.95 – Micrografias da região do centro do depósito. Bico 60. a) Corrente contínua pulsada $f=5$ Hz; b) Corrente contínua pulsada $f=2,5$ Hz; c) Corrente contínua constante	132
Figura 4.96 – Espaçamento dos braços dendríticos no centro do cordão de solda. Comparação entre corrente contínua constante e corrente contínua pulsada utilizando dois tipos de bicos constritores.	133
Figura 4.97 – Efeito do fator modulação de corrente sobre a dureza. Bico constritor de 30°	134
Figura 4.98 – Efeito do fator modulação de corrente sobre a dureza. Bico constritor de 60°	134
Figura 4.99 – Relação da taxa de desgaste (mm^3/m) em função da carga aplicada	135
Figura 4.100 – Aspecto superficial do depósito de Stellite 6. Bico 30°	139
Figura 4.101 – Aspecto superficial do depósito de Stellite 6. Bico 60°	140
Figura 4.102 – Ensaio radiográfico	141
Figura 4.103 – Seção transversal dos cordões para bicos constritores de 30° e 60°	141
Figura 4.104 – Parâmetros geométricos	142
Figura 4.105 – Efeito do bico constritor sobre o grau de diluição	142

Figura 4.106 – Efeito do tipo de bico constritor sobre a dureza	142
Figura 4.107 – Micrografias das amostras de Stellite 6 para o de Bico-30 e B-60	143
Figura 4.108 – Aspecto Superficial e seção transversal de um cordão com largura de 20 mm	144
Figura 4.109 – Posições das regiões para a extração dos corpos de prova para os ensaios de cavitação e medição da diluição	146
Figura 110 – Aspecto superficial dos revestimentos realizados com corrente contínua constante e corrente contínua pulsada. Uma camada	147
Figura 111 – Aspecto da seção transversal dos revestimento	148
Figura 112 – Perfil de dureza apresentado para as regiões A e B do revestimento com corrente contínua pulsada	149
Figura 113 – Perfil de dureza apresentado para as regiões A e B do revestimento com corrente contínua constante	149
Figura 114 – Perda de massa acumulada em função do tempo da liga Stellite 6 depositada sobre o substrato de aço inoxidável 304.	150
Figura 115 – Perda de massa acumulada em função do tempo da liga Stellite 6 x arame Cavitec	151
Figura 4.116 – Fotografia ilustrativa da posição da tocha para soldagem horizontal	154
Figura 4.117 – Fotografia ilustrativa da posição da tocha para soldagem sobre-cabeça	155
Figura 4.118 – Aspecto superficial dos cordões para dois tipos de bico constritor	157
Figura 4.119 – Aspecto superficial dos cordões para três níveis de vazão de gás de arraste	157
Figura 4.120 – Seção transversal dos depósitos para três níveis de vazão de gás de arraste	158
Figura 4.121 – Aspecto superficial do cordão na posição plana	159
Figura 4.122 – Aspecto superficial do cordão na posição horizontal	159
Figura 4.123 – Aspecto superficial do cordão na posição sobre-cabeça	159
Figura 4.124 – Seção transversal do cordão. Posição plana	160
Figura 4.125 – Seção transversal do cordão. Posição horizontal	160
Figura 4.126 – Seção transversal do cordão. Posição sobre-cabeça	160
Figura 4.127 – Parâmetros geométricos	161
Figura 4.128 – Efeito da posição de soldagem sobre o grau de diluição	162
Figura 4.129 – Micrografias das amostras de Stellite 6 junto à superfície. Posição	

plana/posição horizontal/posição sobre-cabeça	163
Figura 4.130 – Micrografias da região de ligação substrato-depósito. Posição plana/posição horizontal/posição sobre-cabeça	164
Figura 4.131 – Micrografias da região do centro do depósito. Posição plana/posição horizontal/posição sobre-cabeça	165
Figura 4.132 – Espaçamento dos braços dendríticos no centro dos depósitos.	
Comparação entre as três posições de soldagem (Plana, Horizontal e Sobre-cabeça)	166
Figura 4.133 – Dureza ao longo da seção transversal dos cordões para diferentes posições de soldagem	166
Figura 4.134 – Aspecto superficial do revestimento uma camada	168
Figura 4.134 – Corte da seção transversal. Características do perfil de penetração e ZAC C1, C2: Regiões das medições de microdureza	168
Figura 4.136 – Dureza Vickers ao longo da seção transversal para um cordão de solda e para o revestimento (regiões C1 e C2)	169
Figura 4.137 – Resultado do ensaio com líquido penetrante	169

LISTA DE TABELAS

CAPITULO 3

Tabela 3.1 – Composição química do substrato de baixo C	29
Tabela 3.2 – Composição química do substrato de aço inoxidável austenítico AISI 304L	29
Tabela 3.3 – Composição química material de aporte Stellite 6 na forma de pó (BT_906)	29
Tabela 3.4 – Composição química material de aporte stellite 6 na forma de arame (BT-906T)	29
Tabela 3.5 – Procedimentos para lixamento e polimento na preparação de superfícies dos corpos de prova	32

CAPITULO 4

Tabela 4.1 – Composição química nominal do aço D6	54
Tabela 4.2 – Variáveis e parâmetros de soldagem-Desempenho do ADP	57
Tabela 4.3 – Variáveis e Parâmetros de soldagem-Análise do gás de arraste sobre o arco plasma	63
Tabela 4.4 – Variáveis e parâmetros de soldagem-Rendimento de deposição	74
Tabela 4.5 – Rendimento de deposição para diferentes níveis de corrente e taxa de deposição. Bico constritor de 30°.	77
Tabela 4.6 – Rendimento de deposição para diferentes níveis de corrente e taxa de deposição. Bico constritor de 60°.	78
Tabela 4.7 – Variáveis e parâmetros de soldagem-Recuo e Distância bico-peça	86
Tabela 4.8 – Variáveis e parâmetros de soldagem-Gás de plasma	92
Tabela 4.9 – Características geométricas medidas para os cordões depositados com três níveis de vazão de gás de plasma	94
Tabela 4.10 – Resultados de análise de variância para a dureza- PTAA	101
Tabela 4.11 – Resultados de análise de variância para a dureza- PTAP	101
Tabela 4.12 – Variáveis e parâmetros de soldagem-Velocidade de soldagem	102
Tabela 4.13 – Características geométricas medidas para os cordões depositados com três níveis de velocidade de soldagem e dois bicos constritores	104
Tabela 4.14 – Variáveis e parâmetros de soldagem-Influência da corrente de soldagem	111
Tabela 4.15 – Características geométricas medidas para os cordões depositados com o	

processo PTAP e PTAA	113
Tabela 4.16 – Variáveis e parâmetros de soldagem-Influência da corrente contínua pulsada	121
Tabela 4.17 – Variáveis e parâmetros de soldagem-Tecimento	137
Tabela 4.18 – Variáveis e parâmetros de soldagem-Ensaio de cavitação	116
Tabela 4.19 – Tempo de incubação e taxa de erosão da liga Stellite 6 depositada sobre o substrato de aço inoxidável 304	150
Tabela 4.20 – Tempo de incubação e taxa de erosão dos revestimentos com arame Cavitec depositados pelos processos Plasma (Cavplasma) e Mig (CavMig).	151
Tabela 4.21 – Variáveis e parâmetros de soldagem-Fora de posição	153
Tabela 4.22 – Características geométricas dos cordões	161
Tabela 4.23 – Resultados de análise de variância para o reforço da solda	162
Tabela 4.24 – Resultados de análise de variância para a dureza na região fundida	167

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOGIAS

η	Eficiência
η_{Tx}	Rendimento de deposição (%)
δ	Diluição (%)
λ	Distância entre duas cristas consecutivas
ASTM	American Society for Testing and Materials
ADP	Alimentador De Pó
Ad	Área útil de deslocamento (mm ²)
At	Amplitude de tecimento (mm)
C ₁ , C ₂	Regiões das medições de microdureza
D	Densidade do pó (g/cm ³)
DBP	Distancia Bico Peça
De	Diâmetro externo do fuso (mm)
Di	Diâmetro interno do fuso (mm)
d	Diâmetro do bico constritor (mm)
f	Frequência de pulsação (Hz)
F	Frequência de tecimento (Hz)
GPr	Gás de proteção (l/min)
GTr	Gás de Transporte (l/min)
HVOF	High Velocity Oxi-Fuel
H'	Distância medida aproximadamente no centro do cordão
I	Corrente de soldagem (A)
I _p	Corrente de pulso (A)
I _b	Corrente de base (A)
I _m	Corrente média (A)
I _{ccc}	Corrente contínua constante (A)
I _{ccp}	Corrente contínua pulsada (A)
INTERDATA	Placa de Aquisição de dados
I_C ₁ , I_C ₂	Amostras corrente contínua constante
I_P ₁ , I_P ₂	Amostras corrente contínua pulsada
L	largura (mm)

Lr	Comprimento da chapa “regime” (mm)
MVG	Medidor de Vazão de Gás
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gás
mm	Milímetros
m_1, m_2	Masa dos corpo de prova antes e depois da operação de deposição (g)
m_{ADP}	Massa de material fornecida pelo alimentador de pó (g)
n	Rotação do eixo (rpm)
PTAP	Processo de Soldagem Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó
PTAA	Processo de Soldagem Plasma de Arco Transferido Alimentado com Arame
PTA	Plasma Transferred Arc
PWM-300	Modelo tocha de soldagem
p	Passo de avanço do helicóide (mm)
P	Penetração máxima (mm)
P_c	Penetração no centro (mm)
P_{zac}	Profundidade da ZAC (mm)
P_{adp}	Pressurização (mbar)
R	Reforço (mm)
rpm	revoluções por minuto
R_c	Recuo (mm)
TIG	Tungsten Inert Gas
t_p	Tempo de pulso (ms)
t_b	Tempo de base (ms)
Tx	Taxa de alimentação (kg/h)
Txd	Taxa de deposição (kg/h)
Ti	Período de incubação (h)
TE	Taxa de erosão (mg/h)
T	Período (s)
TsI	Tempo de subida da corrente (s)
TdI	Tempo de descida da corrente (s)
TiGtr	Tempo de inicio do gás de transporte (s)
TiT _x	Tempo de inicio da alimentação de pó (s)
tdefTx	Defasagem na alimentação de pó

Q	Vazão mássica (kg/h)
V _s	Velocidade de soldagem (cm/min)
VGP	Vazão de Gás de Plasma (l/min)
ZAC	Zona Afetada pelo Calor

RESUMO

Neste trabalho é apresentada uma inovação do equipamento e avaliação do processo de Soldagem Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó (PTAP) com ênfase na sua utilização em revestimentos de superfícies metálicas fora de posição. O projeto foi desenvolvido em cooperação com a UFPR, parceria que permitiu a obtenção dos conhecimentos básicos e a familiarização do processo no Laboratório de Revestimentos Duros do Departamento de Mecânica, em vista da disponibilização de um equipamento importado. Uma bancada de ensaios foi montada no laboratório de soldagem da UFSC-LABSOLDA, fazendo parte integrante dos objetivos deste trabalho. Dois tipos de bicos constritores foram projetados, bico constritor com ângulo de convergência de 30° e bico constritor com ângulo de convergência de 60°, com o objetivo de avaliar o desempenho deste ângulo de convergência sobre a qualidade dos revestimentos. Neste projeto, além da confecção dos equipamentos, foram realizados ensaios que permitiram confrontar a bibliografia especializada com os resultados obtidos. Uma comparação foi realizada entre o Processo de Soldagem Plasma de Arco Transferido Alimentado com Arame (PTAA) e o Processo de Soldagem Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó (PTAP), utilizando-se como material de aporte a liga Stellite 6. Os resultados mostraram que o processo PTAP apresenta menores graus de diluição e uma microestrutura mais fina. A técnica do tecimento mecânico mostrou ser uma boa ferramenta na produção de depósitos. Foram conseguidos cordões com largura de 15 a 20 mm, valores superiores aos conseguidos sem tecimento, que são da ordem de 10 mm. Os revestimentos da liga Stellite 6 depositados pelo processo PTAP usando corrente contínua constante e corrente contínua pulsada, não apresentaram diferença significativa na resistência à cavitação e ao desgaste metal/metal. Foi objetivo também deste projeto caracterizar o processo fora da posição plana. Na posição horizontal e sobre-cabeça foram encontrados resultados inéditos produzindo depósitos de qualidade equivalente aos produzidos na posição plana.

ABSTRACT

This work presents the design of a Plasma Transferred Arc Welding Equipment using powder filler and the evaluation of hard deposits obtained with it. The focus was on the recovering of metallic surfaces. The project was developed in cooperation with the Hard Coating Laboratory of UFPR, partnership that allowed basic knowledge acquirement and process familiarization. As a part of the objectives of this work, a test bench was developed in the LABSOLDA- welding laboratory at UFSC. Two types of constrictor tips were designed, with 30° and 60° convergence angles, in order to evaluate the influence of the convergence angle on coating quality. Besides the equipment design and fabrication, tests were done to compare the results with those from the specialized literature. Using Stellite 6 cobalt base alloy as filler metal, a comparison was done between the characteristics of the deposits obtained with Plasma Transferred Arc Welding Process having the filler in the wire (PTAW) and powder form (PTAP). Deposits were done with constant and pulsed current. Constant current beads were applied with and without weaving. Coating characterization included surface soundness, microhardness, microstructure and coating wear performance on pin on disk and accelerated cavitation tests. Results did not showed significant differences between coatings obtained with filler metal in wire or powder form. Sound coatings were obtained consistently on the overhead position, which represents a novel contribution to the application of the PTAP process for hard cladding .

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

1.1 Introdução

O Processo de Soldagem Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó (PTAP) pode ser considerado uma derivação do Processo de Soldagem Plasma de Arco Transferido Alimentado com Arame (PTAA). Diverge deste pela natureza do material de aporte, uma vez que utiliza pó em vez de arame, e pela necessidade de um terceiro gás para o transporte do pó. Por utilizar metal de adição na forma de pó, o PTAP tem sido utilizado somente para a deposição de algumas ligas atualmente disponíveis. Porém, num futuro próximo, pode-se aplicar na deposição de um amplo espectro de metais, com composições facilmente variadas conforme as necessidades, uma vez que não é restrito à disponibilidade de ligas comerciais, como é o caso do arame.

A proposta do LABSOLDA de estudar o Processo de Soldagem Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó surge em função das vantagens que lhe são atribuídas (Deuis, 1997; Foltran, 2000; Santos, 2003; PLASMA TEAM, 2004). Estas vantagens compreendem:

- Com o processo PTAP pode ser conseguida uma diluição da ordem de 5%, muito inferior aos valores típicos de 20-25% obtidos com processos MIG, TIG e PTAA.
- Os depósitos se caracterizam por uma microestrutura fina em relação àquelas obtidas pelos processos MIG e PTAA.
- Num único passe é possível conseguir depósitos com reforço que varia de 0,6 a 6,0 mm e largura de 3 a 10 mm.
- Maior facilidade para a produção de ligas de enchimento experimentais para diferentes finalidades, mediante a mistura de diferentes pós.

Embora existente no mercado mundial, este tipo de equipamento só é disponibilizado, no país, por poucos fabricantes estrangeiros. A grande restrição de aplicação do processo no Brasil seria a necessidade de importação do equipamento. Quando se decidiu por iniciar o projeto, foi considerado importar uma tocha de soldagem e um alimentador de pó. O fator custo foi considerado essencial, visto que o elevado investimento de aquisição destes equipamentos acabou por restringir sua importação. Desta forma se decidiu por adaptar os equipamentos existentes no laboratório e por outra parte projetar e fabricar aqueles que não estavam disponíveis no LABSOLDA. O resultado dos estudos realizados no projeto de adaptação da tocha de soldagem direcionou ao desenvolvimento de uma tocha multifuncional

permitindo trabalhar com a deposição com pó, arame ou realizar soldas pela técnica “keyhole” (ou furo de fusão).

Em relação ao alimentador de pó, dentre os diversos modelos gerados em ambiente CAD, identificou-se a concepção que melhor atendeu aos objetivos do projeto, tanto em termos de funcionamento na faixa de operação, quanto na capacidade de fabricação.

A primeira contribuição deste trabalho é a inovação do equipamento e o estudo realizado sobre o processo, o que permitiu conhecer o comportamento de cada uma das variáveis que formam o ciclo de soldagem. O estudo foi realizado na posição plana, em uma bancada de ensaios montada no Laboratório de soldagem da UFSC – LABSOLDA. De forma a se ter um maior conhecimento do processo buscando ampliar o campo de utilização, como na posição sobrecabeça, foram realizados ensaios fora de posição plana. Obtiveram-se muito bons resultados, viabilizando desta forma a aplicação do processo na recuperação de pás de turbinas hidráulicas e em equipamentos do setor de petróleo. Assim o projeto apresenta uma segunda grande contribuição referente à soldagem em posições forçadas.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento e estudo do processo de soldagem com a expectativa de ser aplicado nas operações de revestimentos de superfícies, em especial em pás de turbinas hidráulicas desgastadas por cavitação e em equipamentos do setor de petróleo.

Neste contexto pretende-se ressaltar os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver equipamentos e procedimentos de soldagem que possibilitem obter soldas na posição horizontal e sobre-cabeça.
- Avaliar as vantagens de produzir revestimentos através da corrente contínua pulsada em relação à corrente contínua constante

1.3 Justificativas

Apesar das potenciais vantagens atribuídas ao processo de soldagem plasma de arco transferido alimentado com pó quando usado na posição plana, as dificuldades operacionais e a falta de informação técnica se constituem em um problema para o uso mais amplo deste processo. Uma análise da literatura mostrou que a grande maioria dos trabalhos aborda,

somente, a soldagem na posição plana (Plasma Team, 2004; Foltran, 2000; Mekideche, 1989; Silvério, 2003; Santos, 2003), não apresentando procedimentos para a deposição em outras posições. Ocorre que, para viabilizar a aplicação do processo na recuperação de pás de turbinas hidráulicas e em equipamentos do setor de petróleo, o uso de procedimentos qualificados para a posição fora da plana é uma condição fundamental.

Além do desenvolvimento desses procedimentos, outro objetivo deste trabalho é o de procurar o controle da diluição dos depósitos, em virtude da importância que esta exerce sobre a qualidade do reparo. Diversas publicações internacionais (Plasma Team, 2004; Deuis, 1997) relatam que o processo produz uma diluição inferior a 5%, muito menor que a conseguida pelos processos MIG, TIG e PTAA.

Por ser um tema atual e que vem sendo objeto de estudos em países como Itália e Alemanha, este poderá desencadear novas pesquisas com aquelas relativas à inovação do equipamento além de poder ser utilizado na produção experimental de novos materiais de adição em forma de pó para diversos tipos de aplicações. Criam-se, assim, condições para se abandonar a situação de dependência de fornecedores externos.

Outras justificativas que motivaram o desenvolvimento do trabalho são:

- Necessidade de atualização tecnológica do país
- Aplicação de um novo processo para revestimentos o que permite abrir o uso de novos materiais de adição em forma de pó
- Independência tecnológica
- Formação de profissionais que dominem esta tecnologia
- Maior flexibilidade de uso do processo devido à maior quantidade de ligas

1.4 Organização do trabalho

O trabalho desenvolvido foi dividido em cinco capítulos.

O capítulo 1, apresenta uma breve introdução do processo, apresentando-se os objetivos a serem alcançados e a expectativa de aplicação do processo fora da posição plana.

No capítulo 2 é feita uma revisão sobre os conhecimentos fundamentais e os fatos precursores.

O capítulo 3 descreve a bancada de ensaios utilizada e os procedimentos adotados na execução dos ensaios. A primeira parte do capítulo descreve cada um dos equipamentos que

fazem parte da bancada de ensaios. Em seguida são caracterizados os materiais a serem utilizados.

No capítulo 4 realiza-se a análise dos resultados com as respectivas discussões. Para facilidade de leitura o capítulo está dividido em três itens: Equipamentos, Processamento na Posição Plana e Processamento na Posição Horizontal e Sobrecabeça.

O trabalho finaliza com o capítulo 5 onde são apresentadas as conclusões sobre o estudo do processo e com a finalidade de se poder dar continuidade ao estudo do processo, são apresentadas as proposições para os trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

CONHECIMENTOS FUNDAMENTAIS E FATOS PRECURSORES

2.1 Introdução

Um dos primeiros trabalhos de arco plasma foi relatado em 1909, quando Schonherr desenvolveu um dispositivo denominado vórtice de gás estabilizado. A primeira tocha plasma foi desenvolvida pelo Gage ca. em 1953 e patenteada nos Estados Unidos. Patente No. 2806124 (Raghu *et al*, 1996). Mais tarde, o processo plasma ganhou popularidade em corte de metais, aonde vantagens específicas foram observadas em relação às técnicas convencionais. O processo de soldagem e revestimento por plasma são processos relativamente novos, sendo que as primeiras máquinas de soldagem foram reportadas em 1961.

Deuis *et al* (1997) relatam que, no ano 1960, foi desenvolvido o Processo de Soldagem Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó, sendo uma modificação do processo de soldagem plasma convencional. Esta tecnologia foi inicialmente desenvolvida como um método alternativo de fabricação de revestimentos de alta qualidade sobre componentes utilizados na indústria nuclear.

O processo Plasma com Arco Transferido – PTA, com metal de adição em pó, muitas vezes é confundido com a pulverização térmica por plasma. Na realidade, o plasma com arco transferido é um processo de soldagem que é utilizado essencialmente para revestimento de superfícies, com fusão e conseqüente diluição⁽¹⁾ do metal de base. O processo é denominado pela sigla PTA que significa “Plasma Transferred Arc” e um nome mais adequado em português seria PTAP, Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó. Esta versão do processo plasma tem uma relativa similaridade com a versão PTAA– Processo de Soldagem Plasma de Arco Transferido Alimentado com Arame (Oliveira, 2001).

2.2 Processo de soldagem por plasma

O Processo de Soldagem Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó pode ser considerado uma derivação do processo plasma com alimentação automática de arame. A diferença está na natureza do material de aporte, pó em vez de arame, o qual requer de um

⁽¹⁾ A diluição é uma expressão utilizada como uma quantia de ligação que ocorre entre o revestimento e o substrato

terceiro gás para o seu transporte até a região do arco. A Figura 2.1 mostra um esquema de ambos processos.

A proposta do LABSOLDA de estudar o processo de Soldagem PLASMA Alimentado com Pó surge em função das vantagens que lhe são atribuídas. Estas vantagens compreendem:

- Com o processo PTAP pode ser conseguida uma diluição da ordem de 5%, muito inferior aos valores típicos de 20–25% obtidos com processos MIG, TIG e PTAA. Uma vez que a diluição quantifica o grau de mistura entre o metal de base, de baixa resistência a abrasão ou desgaste, e o metal de adição, este de alta resistência. Assim, quanto menor a diluição, maior será a eficiência do revestimento aplicado na proteção ao desgaste erosivo e corrosivo;
- Num único passe é possível conseguir depósitos com reforço de até 6 mm e largura de até 10 mm.

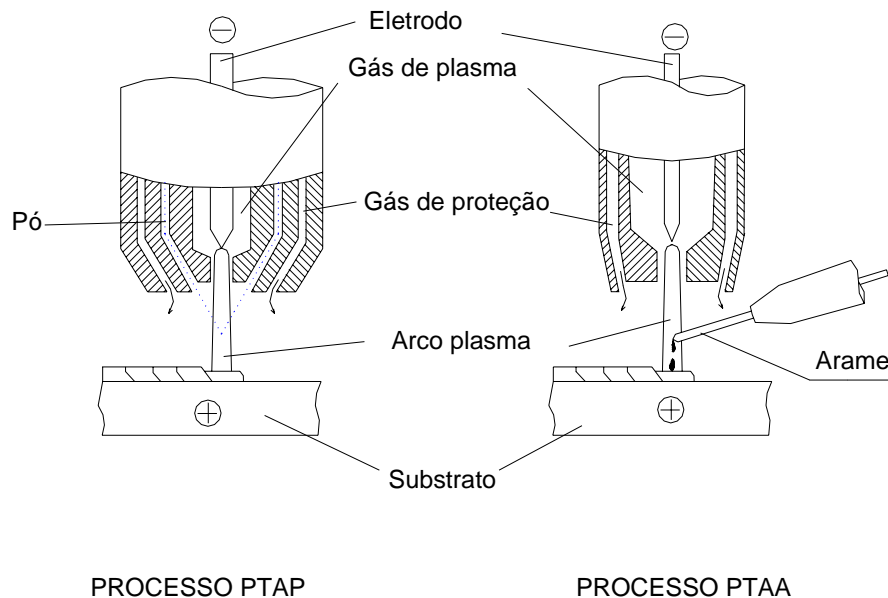


Figura 2.1 – Comparação dos processos Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó–PTAP e Plasma de Arco Transferido Alimentado com arame–PTAA (Dai *et al*, 1991).

Os equipamentos necessários para a execução de depósitos através do processo PLASMA PTAP são muito similares aos empregados no processo PLASMA PTAA. Quando são utilizados os processos MIG/MAG ou mesmo, TIG/PLASMA alimentado automaticamente, é necessário um equipamento capaz de tracionar arames bobinados de diversas bitolas e de diferentes materiais, com velocidades constantes ou pulsadas. Já no Processo de Soldagem Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó, o consumível usado

é na forma de pó, e para poder ser transportado até o arco voltaico para produzir o revestimento é necessário de um equipamento específico denominado de alimentador de pó. A Figura 2.2 mostra o esquema do um alimentador de pó utilizado nesta pesquisa, baseado no trabalho realizado por Allén *et al* (1991). Para compreender melhor o princípio de funcionamento do equipamento, foram definidas quatro etapas:

Etapa 1: Carregamento. O material que está armazenado no reservatório é carregado no fuso transportador por gravidade.

Etapa 2: Transporte mecânico. Nesta etapa é definida a taxa de deposição de material (kg/h). O volume de material é transportado mecanicamente até a etapa 3.

Etapa 3: Descarga. Nesta etapa se produz a dispersão de pó num fluxo de gás (geralmente argônio)

Etapa 4: Transporte. O pó é transportado pelo gás, através de mangueiras flexíveis, até a tocha de soldagem.

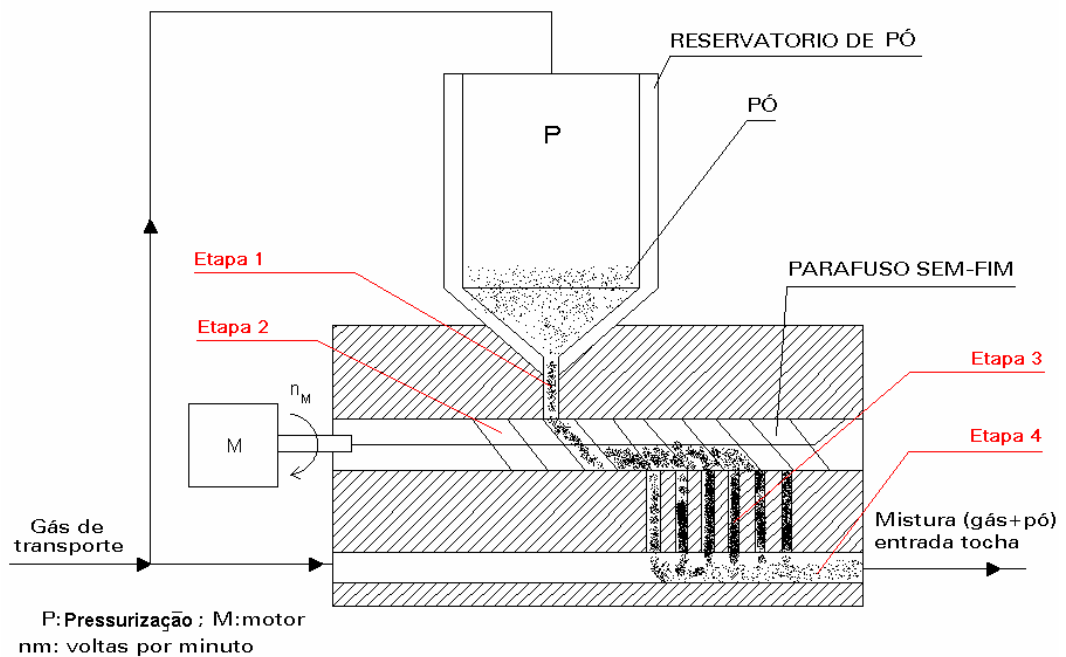


Figura 2.2 – Esquema do alimentador de pó (Allén *et al*, 1991).

A Plasma Team (2004) desenvolve equipamentos para o processo PTAP e fabrica alimentadores de pó para uma taxa de deposição de 0 a 5 kg/h e para granulometrias entre 70 a 150 μm , Figura 2.3.

Por outro lado, a Figura 2.4 mostra um esquema de um alimentador de pó desenvolvido pela DURUM (2004). O equipamento é produzido em duas versões diferentes, para uma taxa de deposição de 1 a 8 kg/h e para 6 a 8 kg/h. No detalhe da Figura, são mostradas as quatro etapas que fazem parte do funcionamento do alimentador de pó.

Outro modelo de um alimentador de pó é apresentado na Figura 2.5, que mostra a foto de um alimentador de pó desenvolvido pela COMMERSALD (2004), com uma taxa de deposição de 0,5 a 3,0 kg/h.

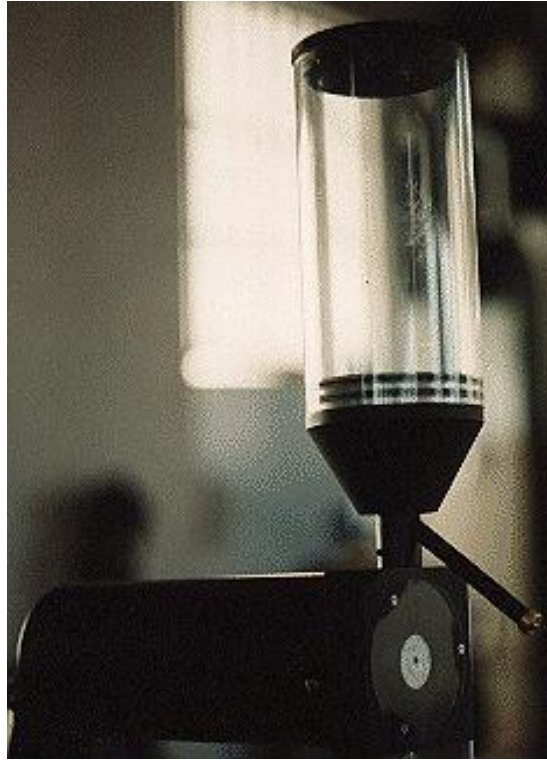


Figura 2.3 – Sistema Alimentador de Pó (PLASMA TEAM, 2004)

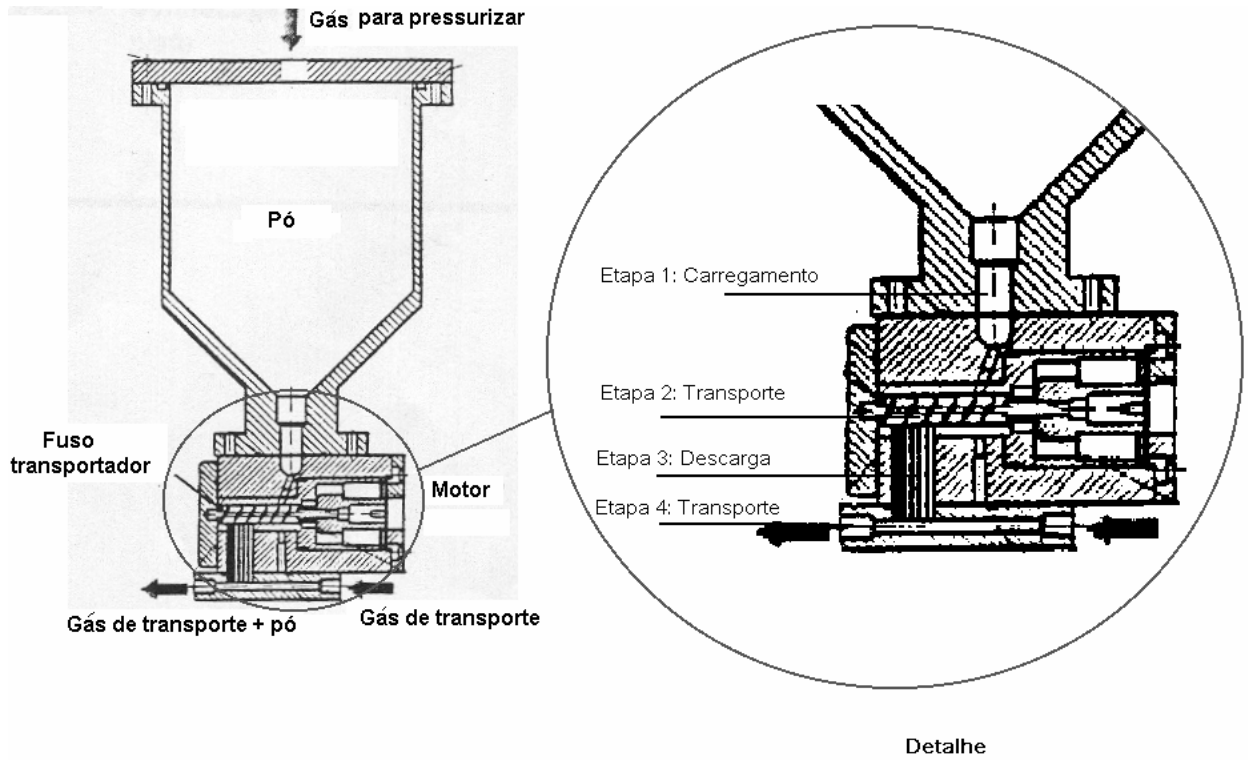


Figura 2.4 – Esquema alimentador de pó (DURUM, 2004).



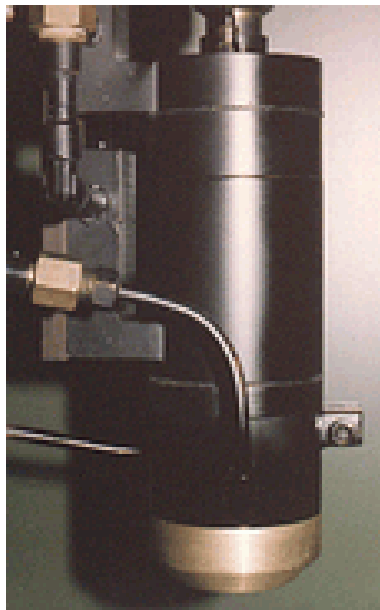
Figura 2.5 – Aparelho alimentador de pó (COMMERSALD, 2004).

A Figura 2.6 apresenta um equipamento importado pela Universidade Federal do Paraná e instalado no laboratório de revestimentos duros. Trata-se de um equipamento STARWELD 300, produzido pela Deloro Stellite.

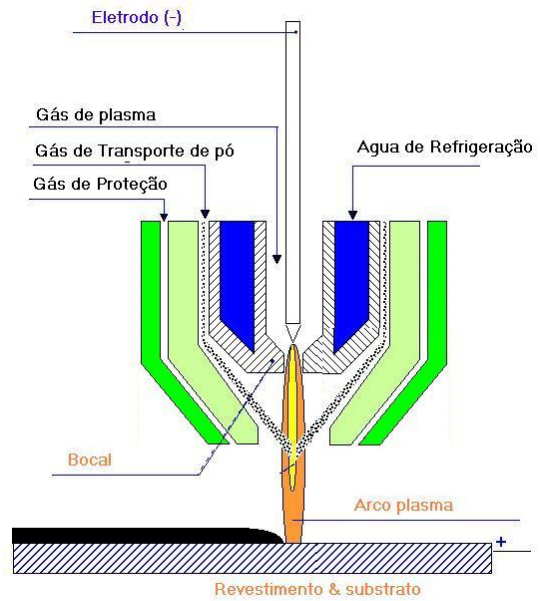


Figura 2.6 – Tocha plasma e sistema alimentador de pó, produzido pela Deloro Stellite. (Silvério, 2003)

A outra característica do processo está na arquitetura da tocha de soldagem. A PLASMA TEAM, da Itália, apresenta uma tocha projetada para o processo Plasma com adição de pó para uma corrente máxima de soldagem de 350 (A). A Figura 2.7a mostra a tocha comercial refrigerada á água e a Figura 2.7b mostra um esquema da mesma. A Figura 2.8, mostra uma tocha desenvolvida pela COMMERSALD, (2004) para uma corrente máxima de soldagem de 200 (A).



a) Tocha de soldagem PTAP



b) Princípio de funcionamento

Figura 2.7 – Tocha de soldagem e esquema de funcionamento (PLASMA TEAM, 2004).



Figura 2.8 – Tocha de soldagem (COMMERSALD, 2004).

A configuração básica do bico constritor é mostrada na Figura 2.9, onde estão indicados os parâmetros empregados no processo. A distância da face externa do bico constritor até o substrato é a chamada de *distância bico-peça* (DBP).

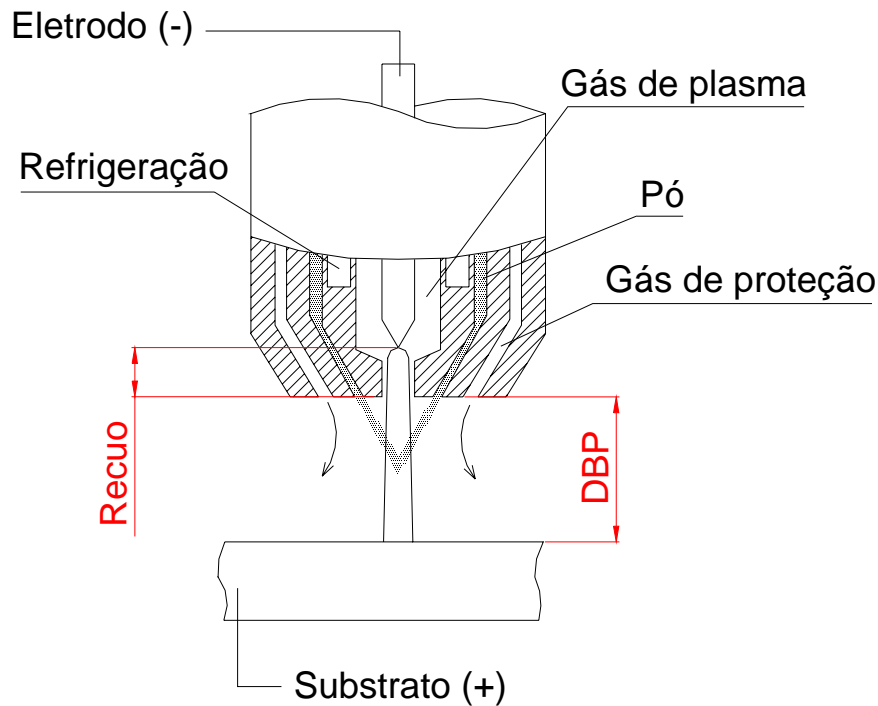


Figura 2.9 – Distância Bico-Peça (DBP) e Recuo do Eletrodo (Rc)

O *recuo* (R_c) do eletrodo é medido desde a ponta do eletrodo até a face externa do bico constritor. As alterações das características do arco são influenciadas por este fator, o qual define o grau de constrição e a rigidez do jato plasma.

Oliveira (2001) estudou a influência do recuo do eletrodo no processo plasma de arco transferido alimentado com arame (PTAA), objetivando identificar uma possível influência do grau de constrição do arco sobre a tensão do arco. Os resultados mostraram em média uma variação da tensão em função do recuo do eletrodo de 2,4 V/mm.

Neste processo são utilizados três fluxos de gases:

- Como *gás de plasma* é utilizado um gás inerte, que é forçado a passar através do orifício do bico constritor, onde o eletrodo é fixado concentricamente;
- O *gás de proteção* passa por um bocal externo, concêntrico ao bico constritor, atuando, efetivamente na proteção da solda contra a contaminação pelo ar atmosférico (pode ser ativo ou inerte);
- O *gás de arraste ou de transporte* é utilizado para carrear o material consumível até o bico constritor permitindo a entrada em forma convergente no arco plasma. O gás geralmente utilizado é argônio.

Devido ao fato do eletrodo de tungstênio ficar no interior do bico constritor da tocha de soldagem, torna-se difícil a abertura do arco por contato, sendo então indispensável a utilização de um equipamento, denominado de módulo plasma, para estabelecer a abertura do arco. Usa-se um circuito que gera uma alta tensão em alta frequência, para produzir a ionização da região situada entre a ponta do eletrodo e o bico constritor. Quando isto ocorre, abre-se um pequeno arco entre o eletrodo de tungstênio e o bico constritor, denominado de arco piloto, Figura 2.10.

Oliveira (2001) relata que o jato de plasma gerado pelo arco piloto, em contato com o substrato, se torna uma espécie de condutor elétrico conectando-o ao eletrodo de tungstênio. Desta forma, quando a fonte de energia é acionada, já existe um caminho preferencial de gás ionizado e condutor de eletricidade, facilitando a abertura do arco transferido entre o eletrodo e o substrato. O arco piloto e o arco transferido são mostrados esquematicamente na Figura 2.10.

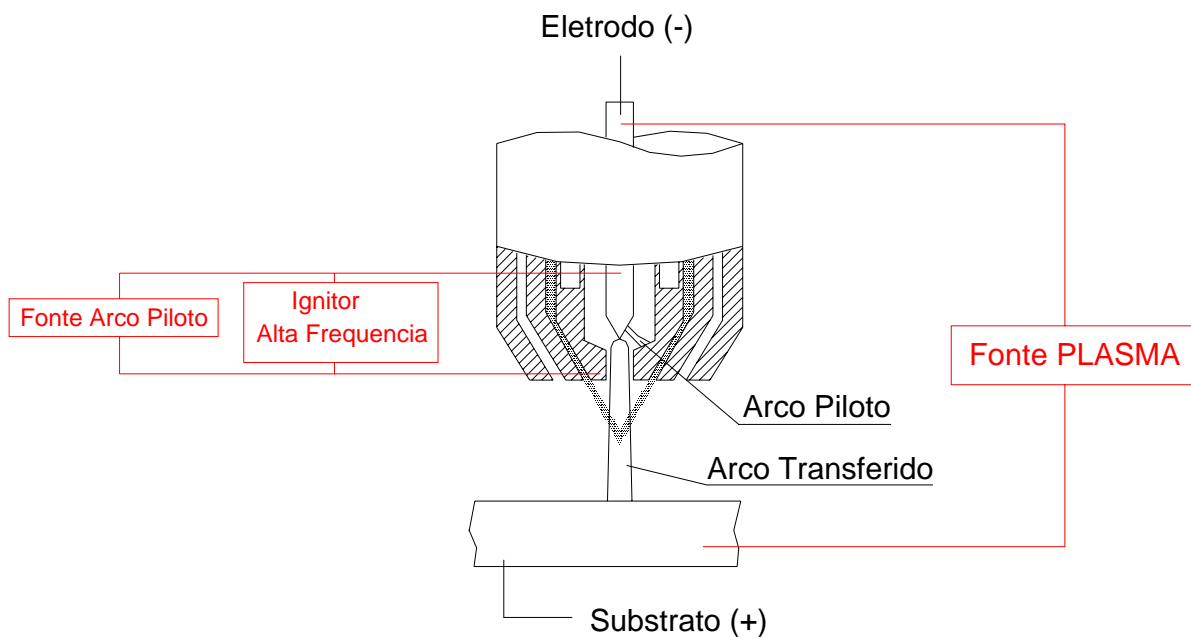


Figura 2.10 – Representação esquemática do arco piloto e do arco transferido

Na prática, os parâmetros que controlam a qualidade da solda são taxa de alimentação de pó, taxa de vazão de gás (gás de proteção, gás de plasma, gás de transporte), corrente de soldagem, distância bico-peça e velocidade de soldagem.

2.3 Influência das condições de processo

2.3.1 Recuo do eletrodo

A distância do eletrodo em relação à face externa do bico constritor é chamada de recuo do eletrodo. Este parâmetro atua sobre o grau de constrição do arco, influenciando, portanto, a rigidez do arco e a penetração do cordão de solda (Oliveira, 2001).

Normalmente, os valores máximo e mínimo para ajuste de recuo do eletrodo variam conforme o modelo da tocha de soldagem. A título de exemplo, a tocha de soldagem PWM-300, fabricada pela Thernal Dynamics Corporation, possui uma faixa de ajuste para o recuo do eletrodo que varia de 0,8 a 2,4 mm.

A Figura 2.11 apresenta esquematicamente o efeito devido à variação do recuo do eletrodo. Quando se desejam arcos rígidos e constritos se deve utilizar um valor de recuo alto. Assim, os cordões de solda produzidos são estreitos e apresentam maior grau de penetração. Assim, os cordões de solda produzidos são estreitos e apresentam maior grau de penetração.

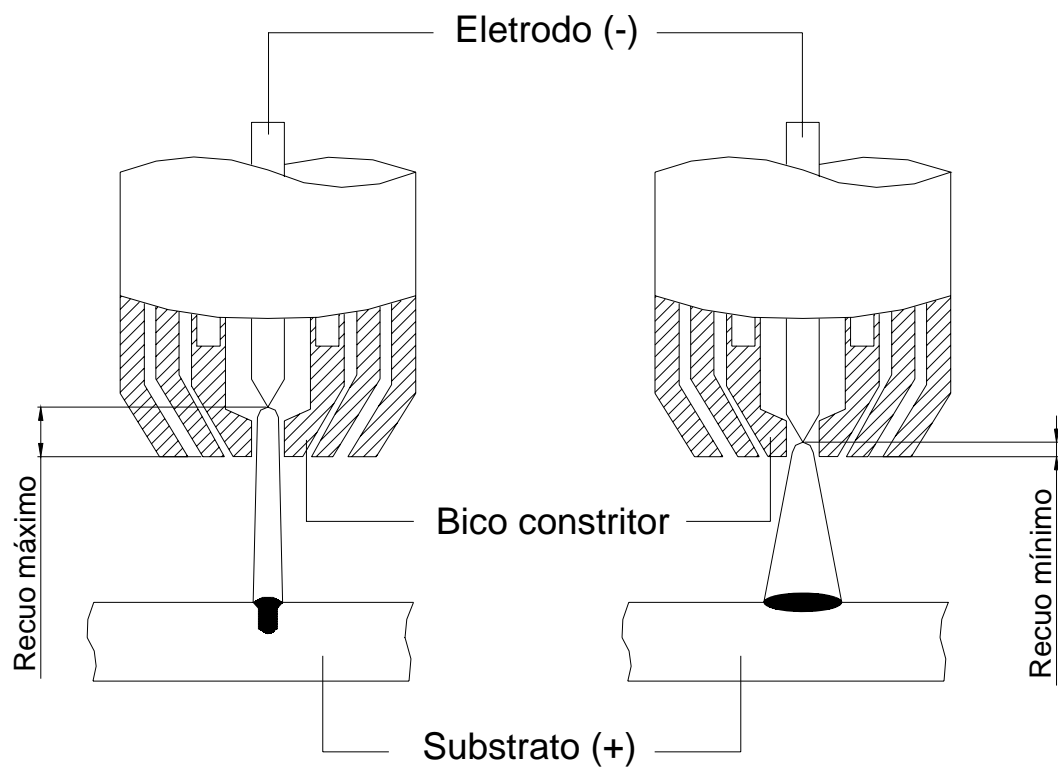


Figura 2.11 – Influência do fator recuo do eletrodo sobre o grau de constrição do arco

À medida que se reduz o recuo do eletrodo, a largura do cordão aumenta e são obtidos cordões com menor profundidade de penetração. Esta variação nas características geométricas do cordão de solda se deve à redução do efeito de constrição, produzindo uma maior área de incidência do arco sobre o substrato.

2.3.2 Diâmetro do orifício constritor

O bico constritor, de cobre, onde o eletrodo fica confinado, apresenta um orifício central pelo qual o arco e todo o volume de gás de plasma passam. O diâmetro do orifício do bico constritor tem uma grande influência sobre a qualidade do revestimento devido a que está relacionado diretamente com a largura e penetração do cordão produzido. Uma vazão de gás de plasma deficiente afeta a vida do bico constritor produzindo seu desgaste. A corrente de soldagem fica mais reduzida a medida em que são utilizados menores diâmetros de orifícios constritores, devido ao aumento de temperatura do arco de soldagem.

2.3.3 Distância bico-peça, DBP

O grau de influência da distância bico-peça sobre o revestimento depende muito do recuo de eletrodo em relação ao bico constritor e do diâmetro do orifício constritor. Quanto maior é o recuo adotado para o eletrodo e menor o diâmetro do orifício constritor, maior é o efeito de constrição do arco, tornando-se mais concentrado.

Na técnica “melt-in” se utilizam pequenos valores de recuo do eletrodo, sendo o arco submetido a um pequeno grau de colimação, assumindo uma forma cônica. Nesta situação, a variação da distância bico-peça, mesmo dentro dos limites normais, resulta na alteração das características do cordão de solda, do mesmo modo que ocorre no processo TIG. Desta maneira, quanto maior é a distância bico-peça, menor a penetração e maior largura do cordão devido ao aumento da área de incidência do arco sobre o substrato.

Deuis *et al* (1997) relatam que para poder obter um bom rendimento de deposição, a distância bico-peça não deve ser maior do que 10 a 15 mm. Para valores acima desta faixa, a eficácia da proteção gasosa é reduzida significativamente.

No trabalho de Hallén *et al* (1991) são mostrados os resultados em relação à distância bico-peça para dois níveis: 15 e 20 mm. A Figura 2.12 mostra que a medida que aumenta a distância bico-peça o grau de diluição diminui.

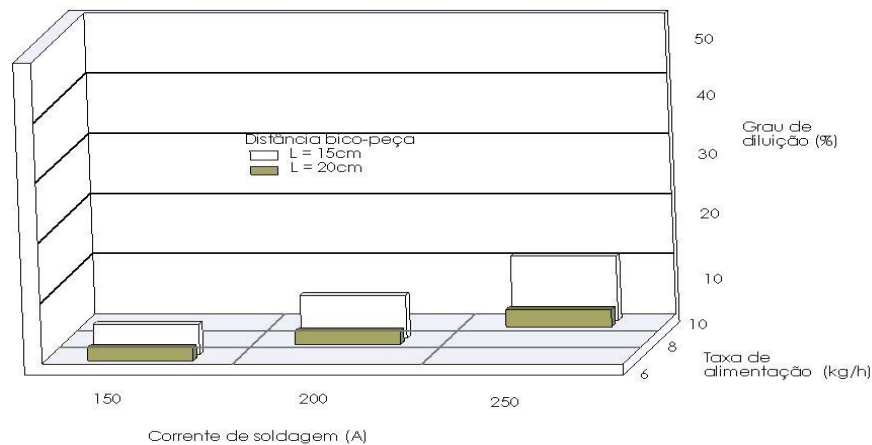


Figura 2.12 – Efeito da diluição em função da distância bico-peça, corrente e taxa de deposição (Hallén *et al*, 1991)

2.3.4 Corrente de soldagem

A corrente contínua em polaridade direta (CC-) é utilizada para a maioria das aplicações, uma vez que a maior parte da energia gerada no arco incide sobre a peça e o desgaste do eletrodo é bastante reduzido. Quando se trabalha com valores baixos de corrente de soldagem, o calor gerado é insuficiente, tanto para fundir o pó, como para fundir a superfície do substrato, de forma que o pó injetado não é incorporado na poça fundida. Quando se trabalha com valores de corrente muito altos, as partículas pequenas são vaporizadas no arco plasma e o rendimento de deposição diminui.

Hallén *et al* (1991) levantaram a curva da Figura 2.13, que mostra a influência de algumas variáveis do processo **PTAP** (Taxa de deposição, corrente de soldagem e vazão de gás de plasma) sobre o grau de diluição. Os resultados indicam que para um mesmo valor de taxa de deposição, a medida que aumenta a corrente de soldagem a diluição também aumenta.

Por outro lado, para um mesmo valor de corrente, a medida que diminui a taxa de deposição o efeito na diluição é de aumentar. Os valores mais baixos de diluição são aqueles obtidos para a uma maior taxa de deposição e menor corrente. No gráfico, é possível observar também, que a diluição aumenta quando são empregadas vazões de gás de plasma maiores.

A diluição tem um efeito significativo sobre a composição química, microestrutura e propriedades dos depósitos. Um elevado valor de diluição também está associado com uma ampla zona afetada pelo calor no substrato e, dependendo da liga, uma redução na dureza dos

revestimentos. Um baixo valor é muitas vezes um indício de uma aderência pobre do revestimento. Os fatores mais significativos que influem na diluição dos revestimentos são: corrente de soldagem, taxa de alimentação, vazão de gás de plasma. Para uma dada taxa de alimentação de pó e velocidade de deposição, um aumento na corrente de soldagem resulta em um elevado valor de diluição. Aumentando a taxa de alimentação de pó (mantendo todos os outros parâmetros constantes) o resultado final será uma redução na diluição. Uma elevada taxa de vazão de gás de plasma aumentará a penetração e, portanto, aumenta a diluição. O efeito de preaquecimento aumenta o tempo de solidificação e estimula o aumento da diluição (Deuis *et al*, 1997).

Barra (1998) observou que os revestimentos soldados podem apresentar níveis distintos de diluição em função não só do tipo de processo de soldagem, como também do grau de automação e das técnicas de deposição empregadas. Este autor ainda demonstra que variações no nível de diluição originam comportamentos diferenciados frente à cavitação.

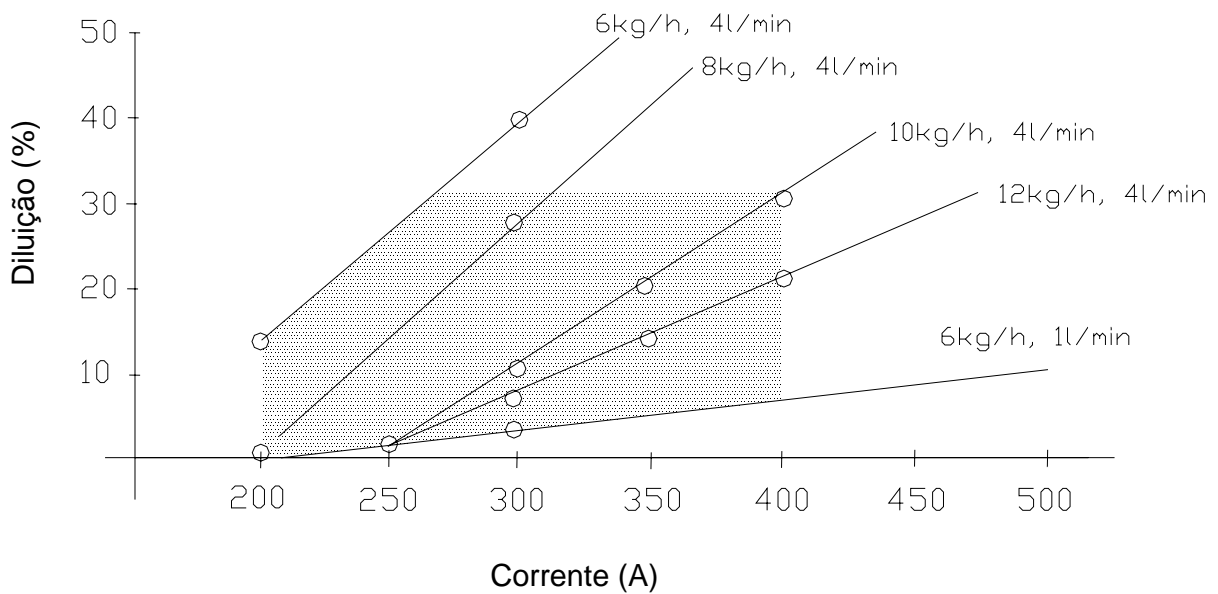
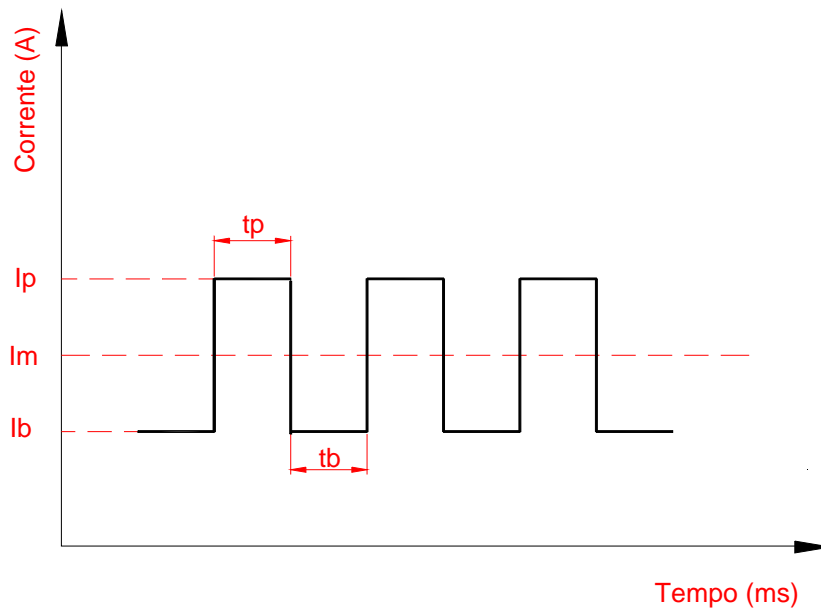


Figura 2.13 – Diluição obtida em função da corrente e da combinação taxa de deposição e vazão de gás de plasma (Hallén *et al*, 1991).

A corrente contínua pulsada pode ser usada em todas as técnicas (micro plasma, melt-in, keyhole). Na corrente pulsada, a amplitude varia entre um valor mínimo (corrente de base, I_b) e um valor máximo (corrente de pulso, I_p), Figura 2.13. A seleção dos parâmetros da corrente contínua pulsada exige maior atenção no processo PTAP, em relação ao processo de

soldagem PTAA, devido às características de alimentação do material de aporte. Neste caso, não se pode pulsar a injeção de pó, ou alimentar com pó somente na fase de pulso, como ocorre no processo com alimentação automática de arame.



I_p : Corrente de pulso; I_b : Corrente de base; t_p : Tempo de base; t_b : Tempo de pulso

Figura 2.14 – Variáveis da corrente contínua pulsada

A corrente média pode ser calculada pela equação:

$$I_m = \frac{I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b}{t_p + t_b} \quad (1.0)$$

O Labsolda desenvolve fontes de soldagem com tecnologia que tornam possível a utilização da corrente contínua pulsada, cuja vantagem sobre a corrente contínua constante está na possibilidade de um melhor controle da poça de fusão e, conseqüentemente, sua aplicação em todas as posições de soldagem. Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas com o intuito de avaliar as vantagens da aplicação de corrente contínua pulsada em relação à soldagem em corrente contínua convencional, mas todas elas são referidas quando o material de aporte está na forma de arame.

Santos (2003) fez um trabalho exploratório sobre os efeitos do tipo de corrente (contínua contante e contínua pulsada) sobre a microestrutura e propriedades de depósitos de liga Stellite 1 obtidos por plasma com arco transferido com alimentação por pó. Nos ensaios, utilizou para o pulso da corrente pulsada os mesmos valores que os da corrente constante. Chegou à conclusão que a corrente pulsada produz um efeito benéfico, pois resulta em valores

de dureza maiores que a corrente contínua constante. Entretanto, as diferenças observadas nos depósitos podem ser devidas às grandes diferenças nos valores de corrente média utilizados para as duas condições. Para que a comparação fosse válida, deveriam ser mantidas em níveis similares as correntes médias.

2.3.5 Características e taxa de alimentação de pó

Como foi dito anteriormente, uma das vantagens do processo PTAP é que o material de consumível utilizado como revestimento está na forma de pó. Devido a esta característica, se pensa que num futuro próximo seja possível obter uma ampla seleção de composições através da mistura de pós de elementos isolados. A faixa do tamanho do pó utilizada é limitada de 50 a 150 μm e a morfologia da partícula de pó também apresenta uma influência sobre o processo (PLASMA TEAM, 2004; Gatto, 2004). São preferidas partículas esféricas sobre partículas de forma irregular devido a que estas últimas resultam numa alimentação deficiente ou irregular (PLASMA TEAM, 2004). Por outro lado, o custo de produção de partículas esféricas é alto, já que são fabricadas por um processo de atomização que envolve o uso de nitrogênio e argônio (Deuis *et al*, 1997). Pós de carbonetos e cerâmicos são geralmente produzidos através de fragmentação mecânica, pelo qual apresentam uma morfologia angular e resultam numa baixa fluidez. Alguns dos compostos para revestimentos aplicados atualmente por PTAP são fabricados usando pó metálicos com partículas cerâmicas desta morfologia.

2.3.6 Influência do nível e concentração de energia

O processo **PTAP** oferece uma taxa de deposição elevada quando é comparada com os processos TIG, laser e plasma spraying. O processo **PTAP** pode ser dividido em três categorias, conforme a taxa de deposição desejada: **MPTAP** (micro PTAP), **PTAP** (PTAP típico) e **HPTAP** (PTAP de alta potência) (Deuis *et al*, 1997; Hallén *et al*, 1991). Quando é utilizado o processo **MPTAP**, o grau de penetração e diluição são mínimos, o reforço dos revestimentos é aproximadamente de 1,5 mm. A taxa de resfriamento também está associada com a categoria a ser utilizada, produzindo uma estrutura de grão fino quando é empregado o processo **PTAP** (típico). O **HPTAP** oferece uma taxa de deposição mais elevada (12–15 kg/h) a qual pode ser comparada com o processo de soldagem por arco submerso (10–40 kg/h). Não obstante, ao contrário do processo de soldagem de arco submerso, o **HPTAP** fornece um revestimento com uma microestrutura fina e uma diluição menor.

Hallén *et al* (1991) relatam que o processo PTA típico atualmente apresenta uma taxa de deposição da ordem de 3 kg/h e que o objetivo de seu estudo é poder desenvolver um novo conceito de PTA com taxas de deposição da ordem de 10 kg/h denominado de HPTA (alta potencia).

A empresa PLASMA TEAM, Itália, que desenvolve o processo PTA, apresenta equipamentos com taxas de deposição de 5 kg/h.

2.3.7 Influência do tipo de material de aporte

Silvério *et al* (2003) apresentam um trabalho exploratório que permite avaliar revestimentos obtidos pelas duas técnicas de alimentação de material de aporte: PTAA e PTAP. Verificou-se neste estudo que revestimentos obtidos com consumível em pó apresentaram uma microestrutura mais refinada quando comparadas aos depósitos com consumível na forma de arame.

Foltran (2000) compara revestimentos de superligas à base de cobalto depositados por eletrodo revestido, plasma PTA e laser. O revestimento a laser apresentou uma microestrutura mais refinada que os demais processos, em função da elevada velocidade de solidificação. O processo de eletrodo revestido apresentou uma estrutura mais grosseira em comparação com os processos laser e PTA.

2.3.8 Características e vazões dos gases empregado no processo

O Argônio ou uma mistura de argônio/hidrogênio é geralmente empregada como gás de proteção no revestimento superficial de materiais ferrosos e não ferrosos. Para o tratamento de substratos de alumínio e titânio, o gás de proteção deve ser totalmente inerte (argônio ou hélio).

No trabalho de Belkacem (2001) que estudou a deposição de ligas de metal duro sobre um substrato de ferro, a resistência ao desgaste dos revestimentos foi melhorada adicionando nitrogênio aos gases do processo. As características dos revestimentos são principalmente dependentes das concentrações de nitrogênio no gás de plasma e gás de transporte. Por outro lado, os parâmetros de soldagem devem ser adaptados em função da composição química do material de aporte e do teor de nitrogênio nos gases. Falta de fusão nas laterais do cordão ou inclusões de gases, são os defeitos mais frequentes quando são utilizadas elevadas concentrações de nitrogênio no gás de arraste e no gás de plasma (gás de proteção: 50% de nitrogênio, gás de arraste: 100% de nitrogênio e gás de plasma 10% de nitrogênio).

A vazão do gás de transporte influi significativamente no rendimento de deposição⁽²⁾ e afeta na composição dos revestimentos. Quando a vazão de gás de transporte é muito elevada, o pó é transportado fora da coluna do arco plasma resultando num desperdício de pó. Geralmente, o gás de transporte consiste de argônio ou uma mistura de argônio/hidrogênio. Os efeitos da taxa de vazão de gás de transporte e a taxa de alimentação de pó sobre a qualidade dos depósitos são mostrados na Figura 2.15. Nesta Figura, a região operacional apresentada, é a região que possui as condições de soldagem que efetivamente possibilitam revestimentos de qualidade.

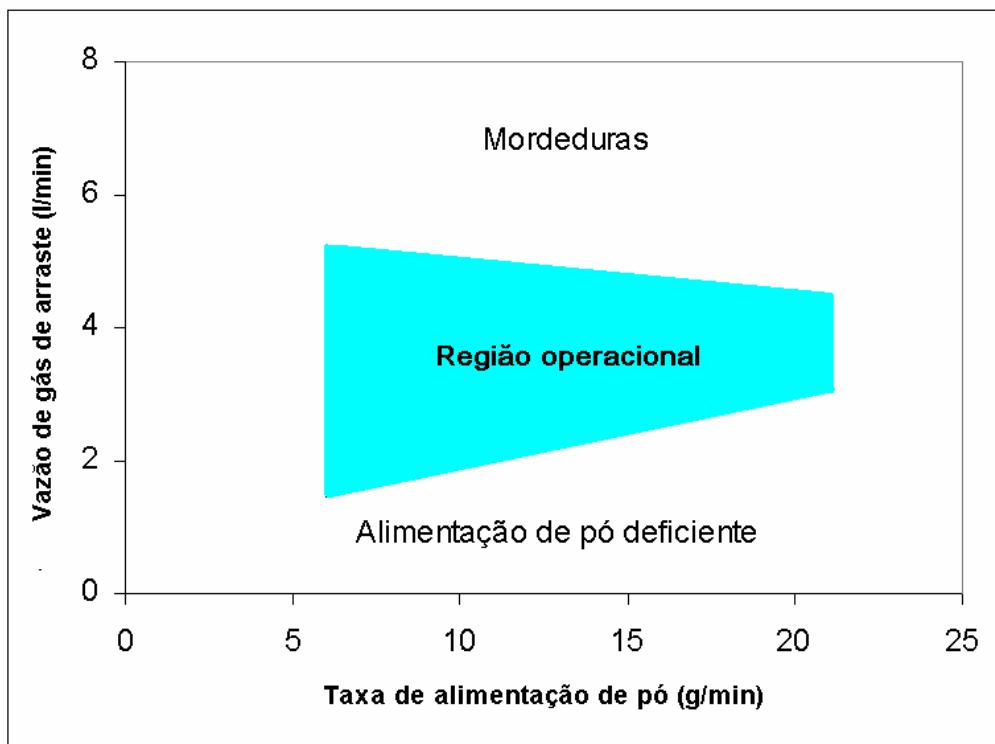


Figura 2.15 – Relação entre a taxa de alimentação de pó e taxa de gás de arraste (Deuis *et al*, 1997)

Deuis *et al* (1997) afirmam que a coluna do arco plasma é influenciada pela taxa de alimentação de pó. Um aumento na taxa de alimentação de pó restringe e resfria a coluna do arco plasma. Vergara *et al* (2004), estudando o efeito da vazão de gás de arraste em depósitos de liga à base de cobalto, realizaram experimentos com dois níveis de vazão (2 e 6 l/min) e observaram que para o maior nível de vazão de gás (6 l/min) ocorreu falta de fusão em praticamente 71 % do cordão.

⁽²⁾ Rendimento de deposição é a relação entre a massa de material depositada no cordão e a massa total consumida.

Huang *et al* (1998) relatam que com vazões de gás de arraste muito elevados, o fluxo se torna turbulento, permitindo a entrada de ar no arco plasma. O resultado final são depósitos com porosidades. Valores de vazão de gás de plasma muito elevados, produzem uma turbulência dentro do arco plasma, ao mesmo tempo que aumenta a velocidade do jato plasma e, como conseqüência, aumenta a força do jato plasma sobre a poça fundida. Elevados valores da taxa de vazão de gás de plasma promovem a formação de poros e óxidos nos depósitos.

Vários autores relatam as vantagens da aplicação do tecimento na produção de depósitos em relação à soldagem sem tecimento (Kou, 1987; Hidaka *et al*, 1993; Barra, 1998). A principal vantagem do ponto de vista de processo está relacionada com a largura do cordão e, por outro lado, as vantagens do ponto de vista metalúrgico estão referidas aos menores valores de diluição. A técnica do tecimento pode ser aplicada por oscilação eletromagnética do arco ou de forma mecânica.

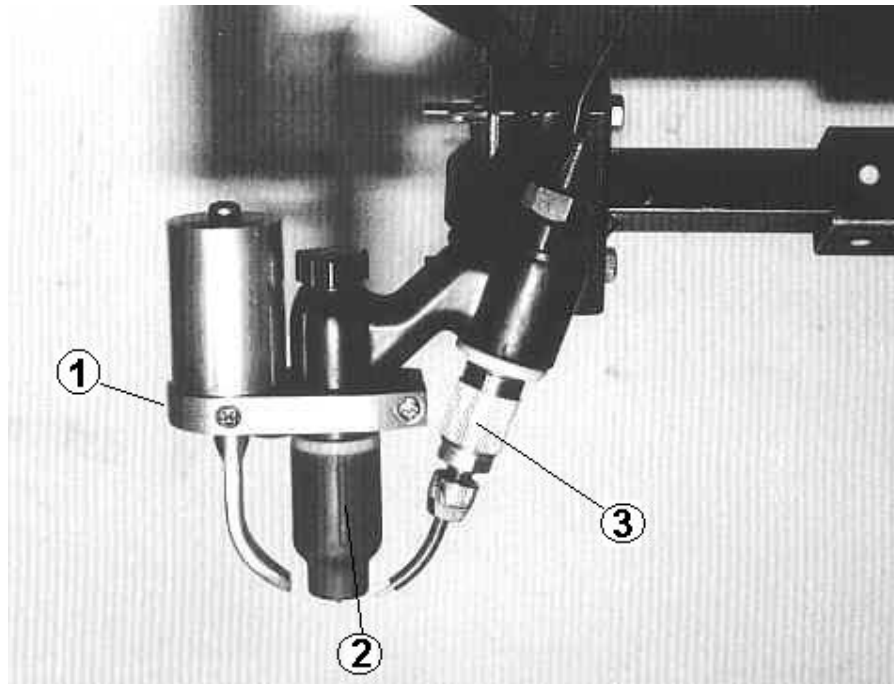
No caso da oscilação magnética do arco, pode-se considerar o plasma como um condutor flexível. Assim, ao estabelecer um campo magnético em torno deste, por exemplo através de um eletroímã, atuará sobre ele uma força capaz de defletí-lo. Quando se inverte sucessivamente o sentido da corrente no eletroímã consegue-se oscilar o arco.

A equipe do LABSOLDA, sob instruções de Eng. Raul Gohr Jr.⁽³⁾, realizou uma série de montagens e testes chegando a obter um projeto eficaz. Neste estudo, a amplitude de oscilação conseguida mostrou-se inteiramente satisfatória e com um arco estável.

A oscilação magnética do arco pode ser utilizada, neste caso específico, para produzir revestimento com uma maior largura. A Figura 2.16 mostra um dispositivo encontrado na bibliografia especializada.

No caso do tecimento mecânico, é realizada uma oscilação da tocha de soldagem mediante algum sistema de deslocamento que permita um controle sobre a velocidade de soldagem e a frequência e amplitude do tecimento.

⁽³⁾ Doutor em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina. Atua junto ao Labsolda/IMC no gerenciamento dos projetos das fontes de soldagem.



1– Oscilador magnético; 2 – Tocha TIG; 3 – Suporte direcionador de arame

Figura 2.16 – Oscilador magnético adaptado na tocha para o Processo TIG Alimentado (ELECTRONICS MAGNETIC OSCILLATOR OM TYPE)

2.4 Aplicações atuais do processo PTAP

O processo **PTAP** é utilizado para depositar ligas resistentes ao desgaste, sejam ferrosas (como aços com elevado teor de carbono e aços inoxidáveis austeníticos) ou não ferrosas (tais como as ligas a base de Ni e Co). Outra aplicação deste processo está na recuperação de pás de turbinas, o que permite minimizar o desgaste abrasivo/erosivo. A técnica **HPTAP** é empregada no reparo de componentes de turbinas (Deuis *et al*, 1997). As pás típicas de turbinas, que possuem uma geométrica côncava, são fabricadas de uma superliga à base de níquel e podem ser reconstruídas usando este processo, devido a que permite obter uma elevada taxa de deposição.

Kuwabara *et al* (2003) citam que as aplicações típicas do processo PTAP são: a fabricação e reparo de parafusos sem fim de extrusoras, válvulas de motores de combustão interna, acessórios para navios, ferramentas de corte e peças para as indústrias petroquímica e de geração de energia.

Superligas à base de níquel e cobalto vêm sendo largamente utilizadas como revestimentos na indústria petroquímica.

Em aplicações contra o desgaste como, por exemplo, em turbinas, os processos de aspersão por detonação (D-Gun) e Plasma com Arco não Transferido são utilizados.

Em trabalhos de revestimentos contra desgaste o processo PTAP vem ganhando importância, referente à aplicação repetitiva e de alto volume. Quando são aplicados materiais nobres, como cobalto e níquel, é requerido que os materiais utilizados sejam otimizados. Devido ao avanço tecnológico, atualmente pode-se contar com alimentadores de pó com maior precisão na medição da taxa de alimentação e aliado à excelente estabilidade do processo de Soldagem Plasma de Arco Transferido, pode-se assegurar, em comparação com outros processos, que uma menor quantidade de material pode ser usada para alcançar as mesmas propriedades nos revestimentos. (Raghu, 1996; Hou, 2004; Gatto, 2004).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Introdução

O desenvolvimento da bancada de ensaios é parte integrante dos objetivos deste trabalho, de acordo com a filosofia de conduta do LABSOLDA. Dessa maneira, a metodologia do empreendimento envolveu o estudo detalhado de equipamentos existentes para que se pudesse projetar, construir, adaptar e testar a bancada experimental. Assim, além da consulta bibliográfica, foi utilizado o equipamento da Universidade Federal do Paraná como base de conhecimento e testes iniciais.

Como equipamento base para a bancada foi logo decidido pela utilização da Central de Soldagem INVERSAL de fabricação LABSOLDA, devido a seu carácter universal de emprego.

São apresentadas as características geométricas dos cordões de solda (largura, reforço, penetração máxima e profundidade da ZAC) que serão consideradas com variáveis de resposta na análise dos resultados. Também são apresentadas as formas de medição do grau de diluição e da dureza dos cordões, também consideradas como variáveis de resposta.

3.2 Bancada de ensaios

Para a realização dos experimentos foi utilizada uma bancada composta pelos seguintes elementos (veja a Figura 3.1): Fonte de soldagem operando em conjunto com um módulo plasma; sistema alimentador de pó (ADP) para o controle da taxa de deposição de pó; medidores digitais de vazão de gás (MVG) para a monitoração do gás de plasma, gás de transporte e gás de proteção. Para a movimentação da pistola de soldagem foi utilizado um sistema de deslocamento, interligado a um microcomputador através de uma placa de aquisição e controle de dados. Desta forma, o controle da movimentação, assim como da vazão do gás de plasma e dos níveis de corrente, podem ser executados através de um programa especialmente desenvolvido para a soldagem PLASMA. Com exceção da válvula de controle de vazão de gás de plasma, os demais equipamentos e programas foram desenvolvidos e fabricados no LABSOLDA/UFSC.

A seguir, descreve-se detalhadamente cada um dos elementos da bancada.



1-Fonte de soldagem; 2-Tocha; 3-Modulo plasma; 4-Alimentador de pó; 5-Sistema de deslocamento da tocha; 6-Medidores digitais de gases; 7-Válvula eletrônica de gás; 8-gases

Figura 3.1 – Montagem da Bancada no laboratório de Soldagem LABSOLDA

3.2.1 Central de soldagem INVERSAL 450. O equipamento é uma fonte de energia para soldagem multiprocesso, desenvolvida e fabricada pelo LABSOLDA/UFSC que reúne numa mesma fonte, todas as características necessárias para possibilitar sua utilização em vários processos de soldagem.

As principais características desta fonte estão abaixo relacionadas:

- Corrente nominal para um fator de carga de 100%: 280 A
- Corrente máxima: 450 A
- Tensão em vazio: 68 V
- Tipo de corrente: Contínua ou alternada
- $\cos \varphi$: 0,95

3.2.2 Módulo Plasma. A sua finalidade é estabelecer o arco piloto do processo. Este sistema possui um circuito que gera alta tensão em alta frequência, ionizando o gás presente na região entre a ponta do eletrodo e o bocal de constrição, de modo que um arco de baixa intensidade é estabelecido entre estas partes. Desta forma, quando a fonte de energia é acionada, já existe um caminho preferencial de gás ionizado e condutor de eletricidade, facilitando a abertura do arco entre o eletrodo e a peça. O módulo plasma foi desenvolvido no LABSOLDA. Ele fornece uma corrente de partida para a abertura do arco de 14 A.

3.2.3 Medidores de Vazão de gás MVG-1. Durante a execução dos ensaios, foram monitoradas as vazões dos gases de proteção, plasma e transporte, através de medidores digitais de vazão modelo MVG-1, desenvolvido pelo LABSOLDA/UFSC.

1. Medidor de gás de proteção. Faixa de operação de 3,0 l/min a 20,0 l/min.
2. Medidor de gás para a formação do plasma. Faixa de operação de 0,4 a 6,0 l/min
3. Medidor de gás para o gás de arraste. Faixa de operação de 0,5 a 6,0 l/min

3.2.4 Controlador de vazão de Gás de plasma. A vazão de gás de plasma foi controlada através de uma válvula de controle de vazão que com um circuito eletrônico realimentado, controla a vazão de gás a partir de uma tensão de referencia colocada pelo sistema. A faixa de operação é de 0,1 l/min a 5,0 l/min. Incerteza de medição: 1% fundo de escala + 2% valor lido.

3.2.5 Software. O “software” utilizado neste estudo foi:

- **PLASMA_PTAP:** Programa desenvolvido no LABSOLDA especificamente para esta pesquisa, que permite o controle da corrente, vazão de gás de plasma, velocidade de soldagem e taxa de alimentação de pó.

O software concebido para o projeto obedeceu a estratégia de ser altamente flexível e didático. Entretanto, foi levado também em consideração a sua transformação em produto comercial.

3.2.6 Placa de aquisição INTERDATA. A placa possui: um conversor A/D de 16 canais, com 14 canais disponíveis para efetuar a aquisição de dados; um conversor D/A de 8 canais, que é utilizado para o controle de equipamentos; uma porta digital com 8 entradas e 8 saídas utilizadas para ativar e desativar equipamentos, ou realizar comunicação digital de dados.

3.2.7 Sistemas de deslocamento da tocha de soldagem TARTÍLOPE V1 E TARTÍLOPE V2. Nos ensaios executados na posição plana, horizontal e sobrecabeça, foi utilizado um sistema de deslocamento da tocha TARTÍLOPE V1, construído no LABSOLDA, cujas características operacionais são citadas a seguir:

Faixa de operação: 5 a 160 cm/min

Resolução de velocidade de deslocamento: 0, 2 cm/min

Resolução de posicionamento: 1 mm

Na execução dos ensaios com tecimento foi utilizado o TARTÍLOPE V2, que permite realizar tecimentos do tipo trapezoidal, triangular e retangular.

3.2.8 Tocha de soldagem Plasma marca Thermal Dynamics modelo PWM-300. Esta tocha de soldagem precisou ser adaptada para possibilitar a alimentação do metal de adição em pó. Para isso, foram projetados, fabricados e montados os componentes necessários. Esta tocha é indicada para soldagens em corrente contínua e polaridade direta e suporta uma corrente máxima de 300 A.

3.2.9 Alimentador de pó (ADP). Equipamento desenvolvido no LABSOLDA especificamente para esta pesquisa. Permite uma taxa de alimentação de pó entre 0,5 a 2,0 kg/h.

3.3 Materiais

3.3.1 Substrato/Material de base

Os ensaios foram realizados em chapas de aço baixo carbono e aço inoxidável austenítico AISI 304. As análises químicas foram realizadas pela empresa PRESICAST por espectrometria de emissão óptica. Nas Tabelas 3.1 e 3.2 são apresentadas as composições químicas correspondentes.

3.3.2 Material de aporte

O material de aporte utilizado foi a liga Stellite 6 na forma de pó e arame. As Figuras 3.2 e 3.3 mostram a granulometria e a morfologia do pó depositado pelo processo PTAP.

As Tabelas 3.3 e 3.4 apresentam as composições químicas correspondentes.

Tabela 3.1 – Composição química do substrato de aço baixo carbono

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
0,11	0,22	0,74	0,021	0,008	0,027	0,024	0,011	0,06
Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	Fe	
-	0,016	-	-	0,015	0,026	0,065	98,6	

Espessura : 12,7 mm

Tabela 3.2 – Composição química do substrato de aço inoxidável austenítico AISI 304

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
0,09	0,48	1,37	0,02	-	18,69	0,07	8,58	-
Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	Fe	
0,14	0,06	0,017	-	0,04	0,035	0,17	70,27	

Espessura : 10,25 mm

Tabela 3.3 – Composição química do material de aporte Stellite 6 na forma de pó (BT-906)

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Co	W	Fe
1,32	1,30	0,028	30,01	0,24	2,45	Bal	5,21	2,05

Dureza: 38-47 Rc; Granulometria: 45 a 150 µm; Densidade: 8,3 g/cm³

Tabela 3.4 – Composição química do material de aporte Stellite 6 na forma de arame (BT-906T)

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Co	W	Fe
0,9-1,4	2,0	1,0	26-32	1,0	3,0	Bal	3,0-6,0	2,0

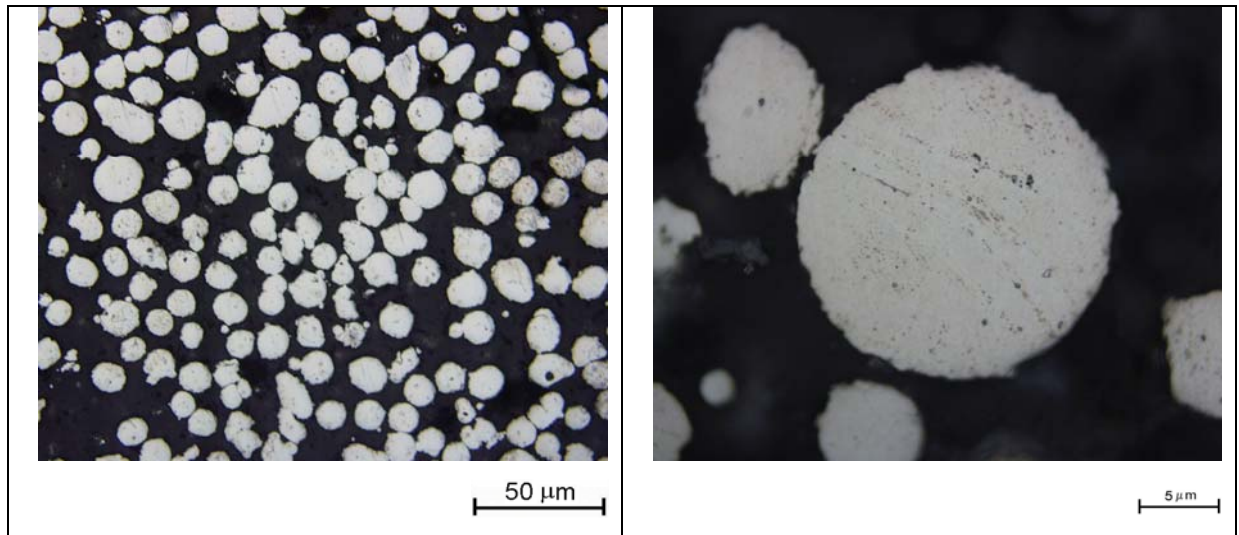
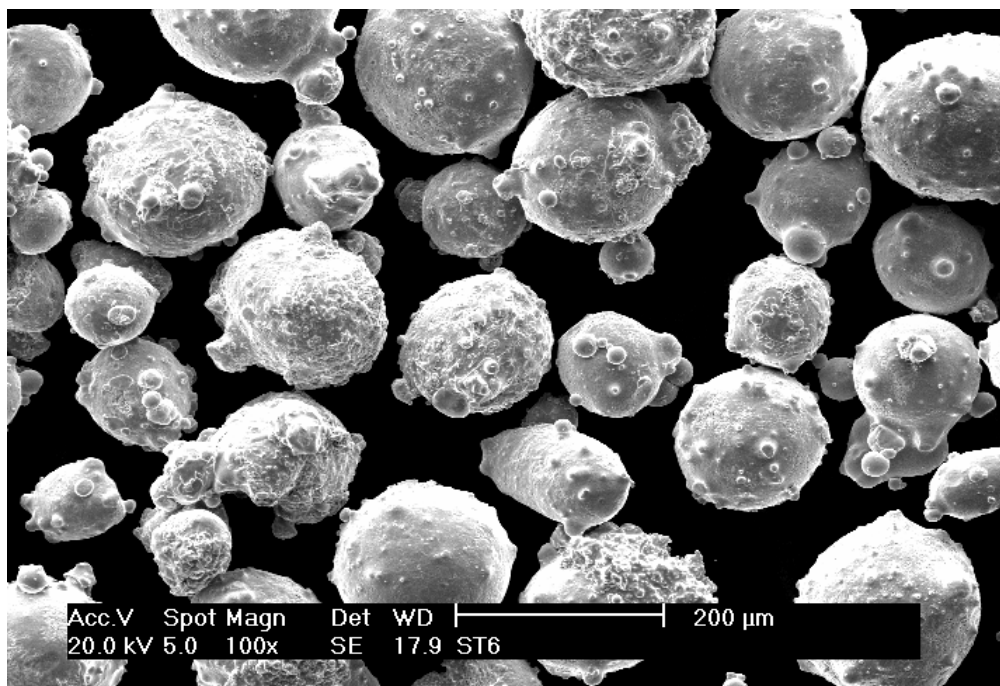
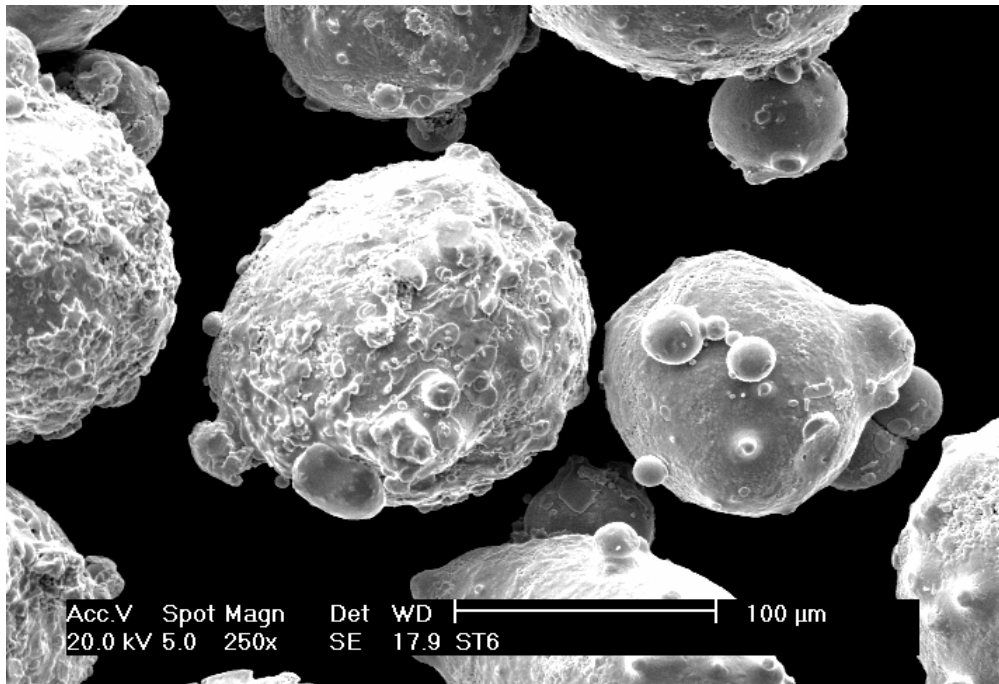


Figura 3.2 – Granulometria do pó depositado pelo processo PTAP - Stellite 6, 45 a 150 µm



3.3 a) Morfologia da liga Stellite 6 (100x)



3.3 b) Detalhe (250x)

Figura 3.3 – Morfologia do pó depositado pelo processo PTAP - Stellite 6, 45 a 150 μm

3.3.3 Gases

Nos ensaios foi utilizado argônio com pureza de 99,99 % como gás de plasma, de proteção e de arraste.

3.3.4 Eletrodo

Utilizou-se um eletrodo de tungstênio com 2% de óxido de tório (EWTh-2) com diâmetro de 4,8 mm. O ângulo da ponta do eletrodo foi mantido em 30° para todos os experimentos.

3.4 Metodologia experimental

3.4.1 Análise geométrica das amostras. Os corpos de prova foram seccionados no sentido transversal ao cordão de solda e submetidos a uma preparação metalográfica. O ataque químico foi Nital ao 6%. A Figura 3.4 mostra as dimensões medidas nos cordões de solda: largura (L), reforço (R), Penetração máxima (P), Penetração no centro (Pc), Profundidade da ZAC (Pzac), H'=distância medida aproximadamente no centro do cordão.

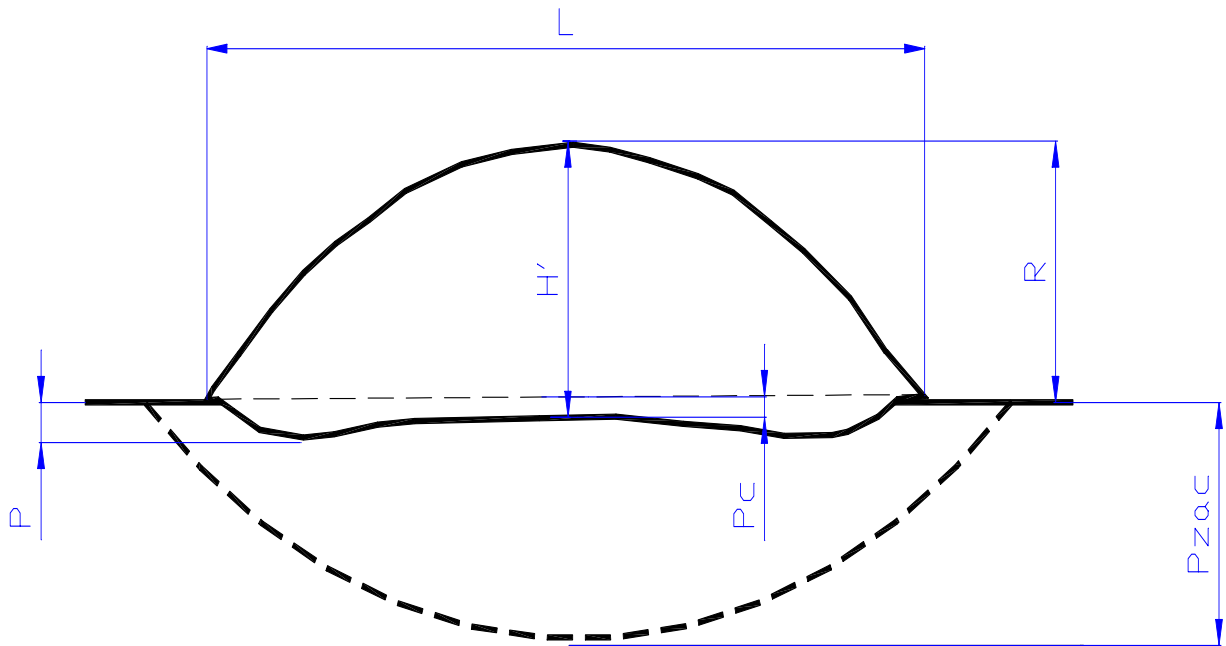


Figura 3.4 – Dimensões geométricas do cordão de solda

3.4.2 Preparação das amostras para exame metalográfico. As amostras foram preparadas para exame metalográfico de acordo aos procedimentos padrões de embutimento, lixamento e polimento. O lixamento manual foi realizado conforme a Tabela 3.5, segundo o procedimento adotado por Barra (2003).

Tabela 3.5 – Procedimentos para lixamento e polimento na preparação de superfícies dos corpos de prova

Lixamento				
Lixa	Lubrificante	Tempo (min)		rpm
180	água	Até atingir planicidade		150
220	água	4		150
320				
400				
500				
600				
1000				
Polimento				
Pano	Abrasivo	Lubrificante	Tempo (min)	rpm
DP-Pan	Alumina (0,3 μm)	Álcool	3	300

Revelação da estrutura.

a – Macrográfica

Reagente: Nital a 6% (6 ml HNO₃ + 94 ml C₂H₅OH)

b – Micrografia

Ataque eletrolítico, utilizando como eletrólito ácido oxálico saturado em água destilada a 25° C.

Procedimento. Formar uma camada anodizante pela imposição de uma diferença de potencial de 6V.

Distância entre ânodo e cátodo: 15 mm

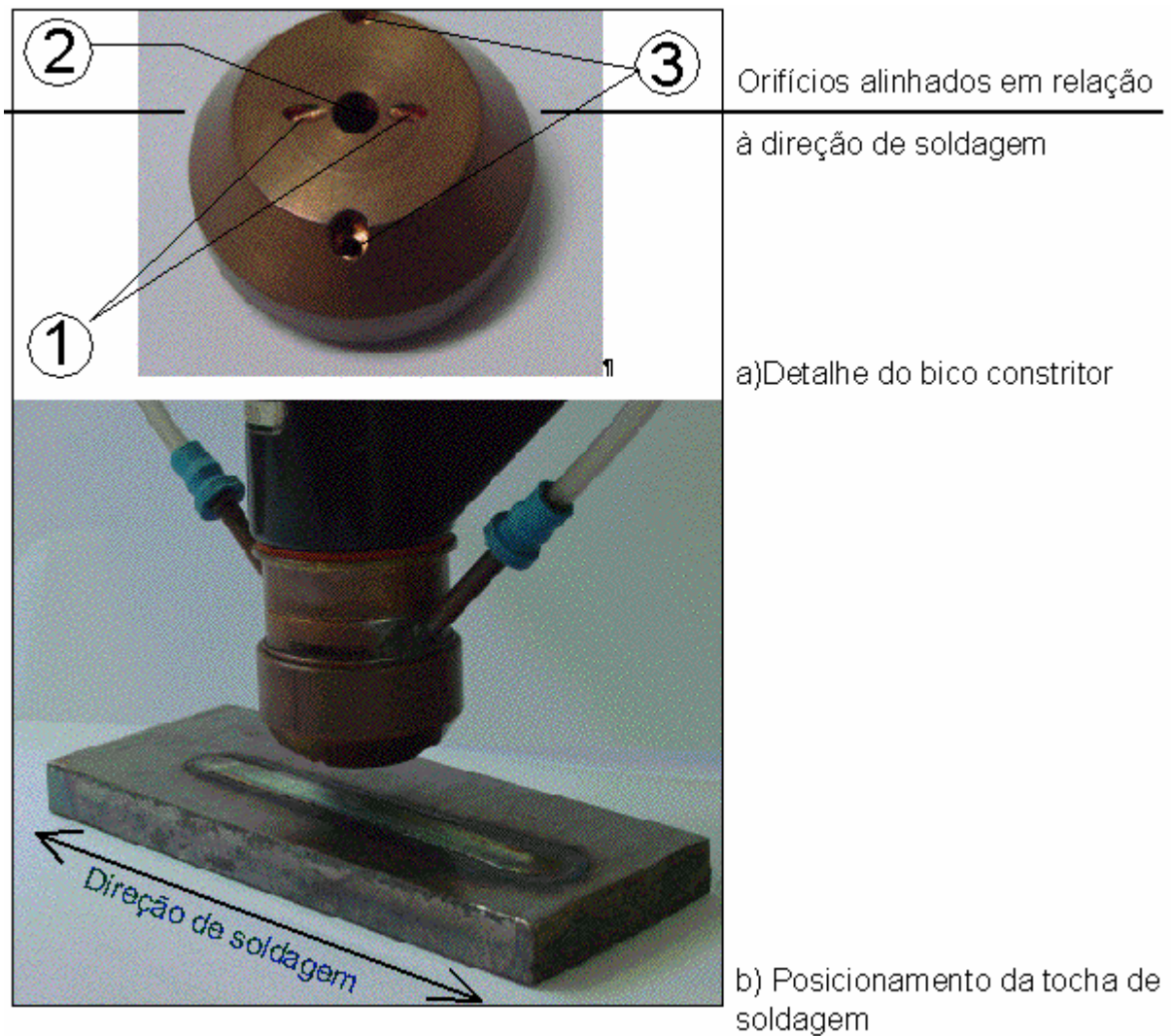
Dimensões do cátodo: 37x24x1 mm, aço inoxidável

Tempo de ataque: 5 s

Temperatura do eletrólito: 25 °C

3.4.3 Ajuste da tocha de soldagem. O valor ajustado para o recuo do eletrodo foi de 2,4 mm, introduzindo-se um calibre padrão, acessório que acompanha a tocha de soldagem. Observou-se atentamente a centralização do eletrodo. A tocha foi alinhada verticalmente a 90° com o substrato.

3.4.4 Posicionamento da tocha de soldagem. A tocha de soldagem deve ser posicionada em função dos orifícios que permitem a passagem do fluxo de gás e pó. Os orifícios estão localizados na face externa do bico constritor, em um diâmetro concêntrico de 15 mm, em relação ao orifício constritor. Os dois furos que permitem a passagem do gás de arraste, devem estar alinhados em relação à direção de soldagem. A Figura 3.5 mostra o detalhe do bico constritor e o posicionamento da tocha.



1-Orifícios para a passagem de pó; 2-Orifício constritor; 3-Orifícios de fixação

Figura 3.5 – Visão geral do posicionamento da tocha de soldagem

3.4.5 Ajuste da distância bico-peça. A distância bico-peça foi ajustada com auxílio de um padrão, sendo o valor medido a partir da face externa do bico constritor até a superfície do substrato. Este posicionamento foi feito através de uma cremalheira no sistema de fixação da tocha.

3.4.6 Padrão de aceitação. O padrão de aceitação adotado foi: soldas com bom aspecto superficial e ausência de defeitos tais como porosidades, trincas, mordeduras acentuadas e falta de penetração nas laterais.

3.4.7 Determinação do grau de diluição. Com o emprego do estereoscópio foram obtidas imagens macrográficas da seção transversal dos corpos de prova para a determinação do grau

de diluição. A avaliação foi feita através das medições das áreas A e B como mostra a Figura 3.6, utilizando-se um programa comercial.

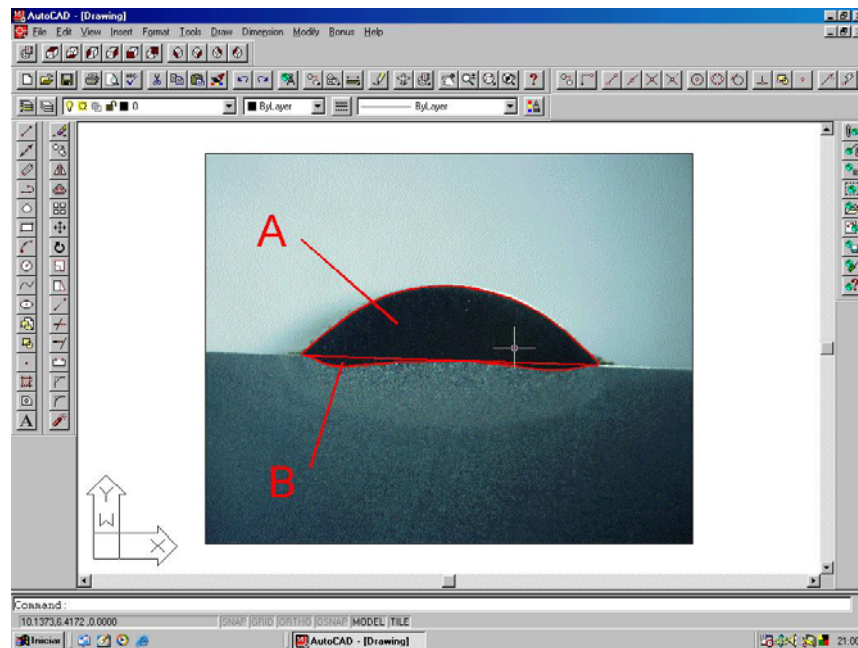


Figura 3.6 – Determinação do grau de diluição. Tela do software comercial. Seção transversal de um dos revestimentos depositados por PTAP.

3.4.8 Perfil de microdureza. O perfil de microdureza Vickers foi medido na seção transversal da amostra, na direção perpendicular à superfície do substrato, iniciando numa distância de 125 μm do topo do cordão, com espaçamento entre impressões de 250 μm de modo a ter um afastamento entre impressões de no mínimo 2,5 vezes a diagonal das mesmas (ABNT NBR 6672/81). No total foram executados 3 perfis de dureza, para calcular um valor médio. Empregou-se o microdurômetro HMV 2000 da Shimadzu, com carga aplicada de 500g (HV 0,5). A Figura 3.7 mostra um esquema da seção transversal do cordão, indicando a localização das impressões de microdureza.

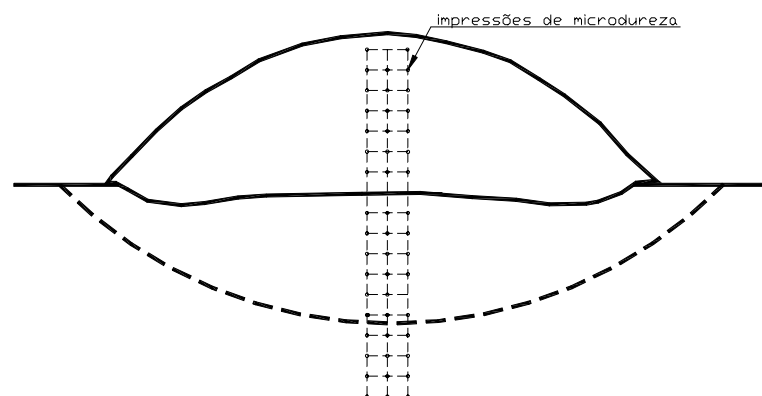


Figura 3.7 – Esquema da seção transversal do cordão, indicando a localização das impressões de microdureza

3.4.9 Espaçamento dos braços dendríticos (ASTM E-112). Através de metalografia quantitativa e utilizando o método das interseções, foi medido, no centro da seção transversal do cordão, o espaçamento interdendrítico. As medidas foram feitas pelo método linear sobre as imagens obtidas no microscópio com uma ampliação de 50 vezes.

A razão entre o comprimento das retas e do número de interseções com as dendritas fornece o espaçamento interdendrítico:

$$NL=LT/P \quad (2.0)$$

LT : comprimento da linha teste

P : número de interseções

3.4.10 Resistência dos depósitos de Stellite 6 ao desgaste por deslizamento. Com o intuito de qualificar os depósitos foram realizados testes de resistência ao desgaste por deslizamento, mediante equipamento de teste de Pino sobre Disco conforme à norma (ASTM G99-95A). Os ensaios foram realizados num equipamento desenvolvido no laboratório de revestimentos duros da UFPR. Os pinos para o ensaio (de 3 mm de diâmetro) foram retirados dos depósitos através de eletro-erosão. A dimensão do diâmetro do pino foi adotada em função da largura mínima dos depósitos (veja a Figura 3.8). Foram manufacturados 15 pinos de cada cordão. A Figura 3.8 mostra os pinos manufacturados a partir dos depósitos. Inicialmente os corpos de prova sofreram retificação da superfície dos cordões obtendo uma rugosidade Ra entre 0,2 e 0,3 μm .



Figura 3.8 – Corpo de prova mostrando a região de onde foram retirados os pinos

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Equipamentos

4.1.1 Testes de desempenho da tocha adaptada

4.1.1.1 Introdução

Nesta etapa, através do teste de estanqueidade do sistema de refrigeração a água, procurou-se verificar possíveis vazamentos. Em seguida foram realizados testes de gás de plasma, gás de proteção e abertura do arco piloto. O arco piloto foi mantido aceso por 10 segundos e logo o mesmo teste foi realizado 5 vezes consecutivas para finalmente deixar o arco piloto aceso por 10 minutos com uma vazão de gás de plasma de 2,4 l/min. O teste da abertura do arco principal foi realizado com uma corrente de 60 A com uma duração de 10 s. Neste caso específico foi utilizada uma chapa de cobre refrigerada a água como material de base (250x65x6 mm) e foi utilizada uma câmera termográfica para a medição da temperatura na tocha. A temperatura da tocha foi medida no instante em que o arco principal era desligado. Finalmente foram realizados ensaios com correntes de 80, 100, 120, 140, 160, 180 e 200 A.

4.1.1.2 Projeto da tocha adaptada

O projeto considerou não comprometer o funcionamento normal da tocha PWM-300 (Figura 4.1) com plasma convencional e por isso, foram projetadas quatro peças que podem ser instaladas quando se quiser produzir revestimentos com pó.

Os estudos realizados direcionaram o desenvolvimento da tocha para uma concepção mostrada na Figura 4.2. A Figura 4.3 apresenta a seção transversal da tocha modificada na qual se mostra o sistema de refrigeração do bico constritor, sistema do gás de arraste, gás de plasma e gás de proteção.



Figura 4.1 – Tocha PWM-300 da Thermal Dynamics existente no laboratório

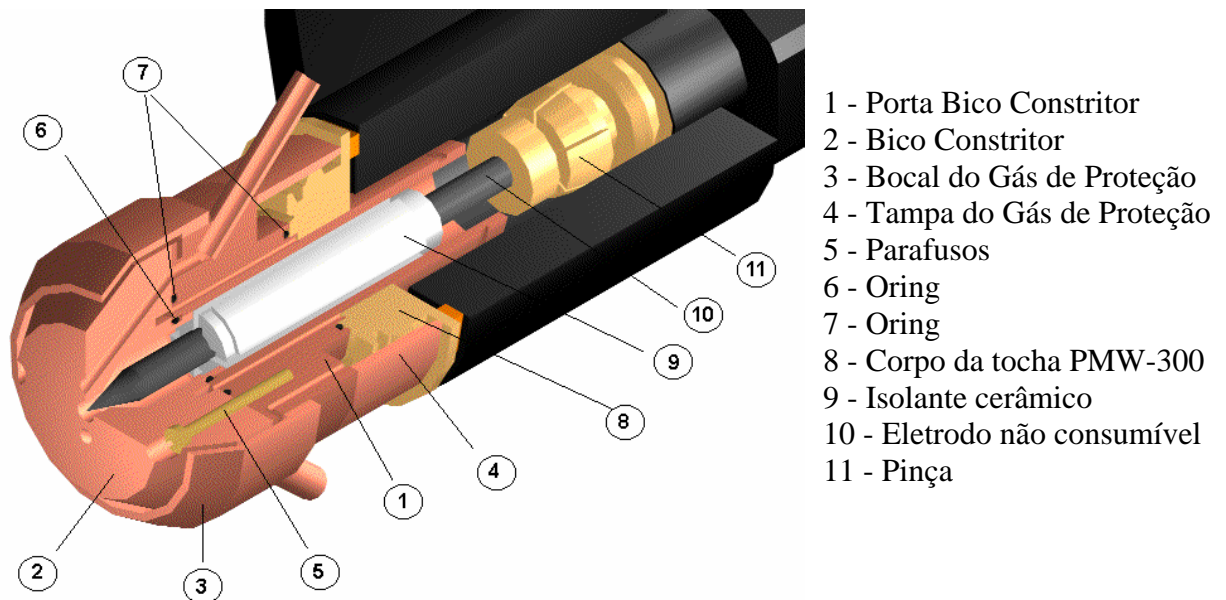


Figura 4.2 – Modelo gerado em ambiente CAD da tocha plasma adaptada PTAP.

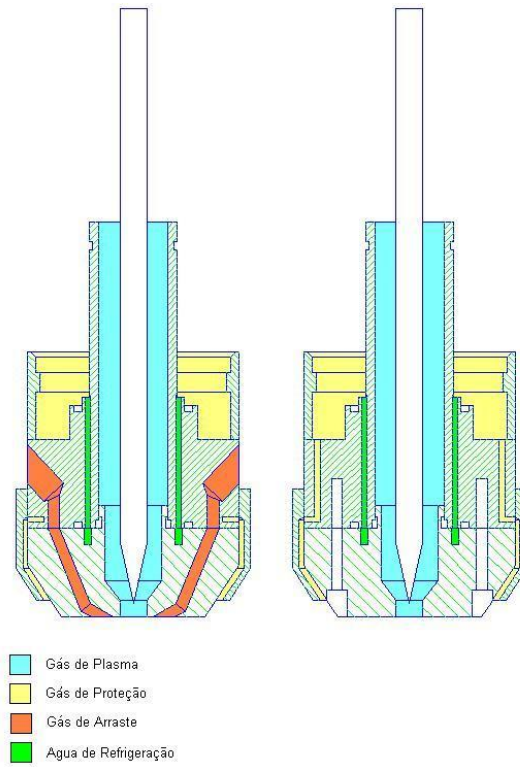


Figura 4.3 – Seção transversal da tocha adaptada

A Figura 4.4 apresenta a tocha com as quatro peças fabricadas segundo o modelo da Figura 4.2.

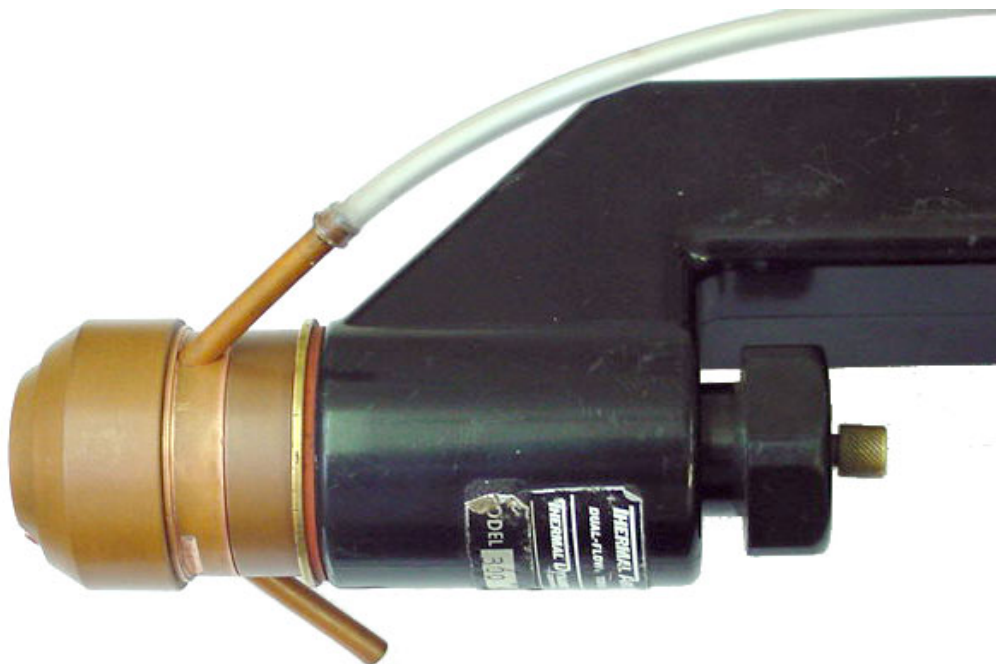
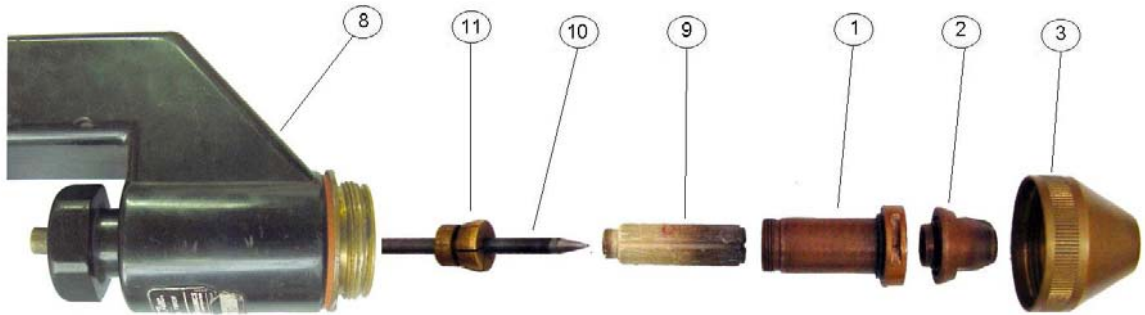


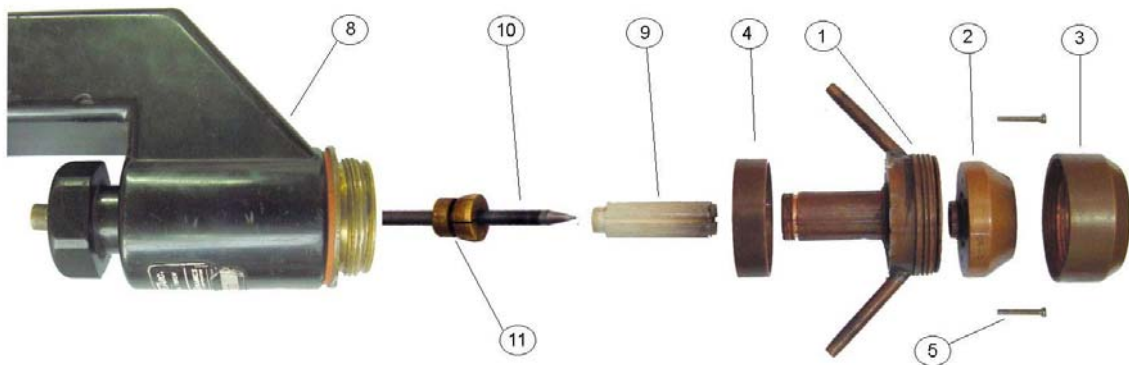
Figura 4.4 – Montagem tocha PTAP adaptada pelo Labsolda

As Figuras 4.5 e 4.6 comparam em vista explodida a Tocha PLASMA PWM 300 original e a adaptação feita para o processo PTAP, respectivamente.



1-Porta bico constritor; 2-Bico constritor; 3-Bocal do gás de proteção; 8-Corpo da tocha PMW-300; 9-Isolante; 10-Eletrodo não consumível; 11-Pinça

Figura 4.5 – Tocha PWM-300 existente no laboratório



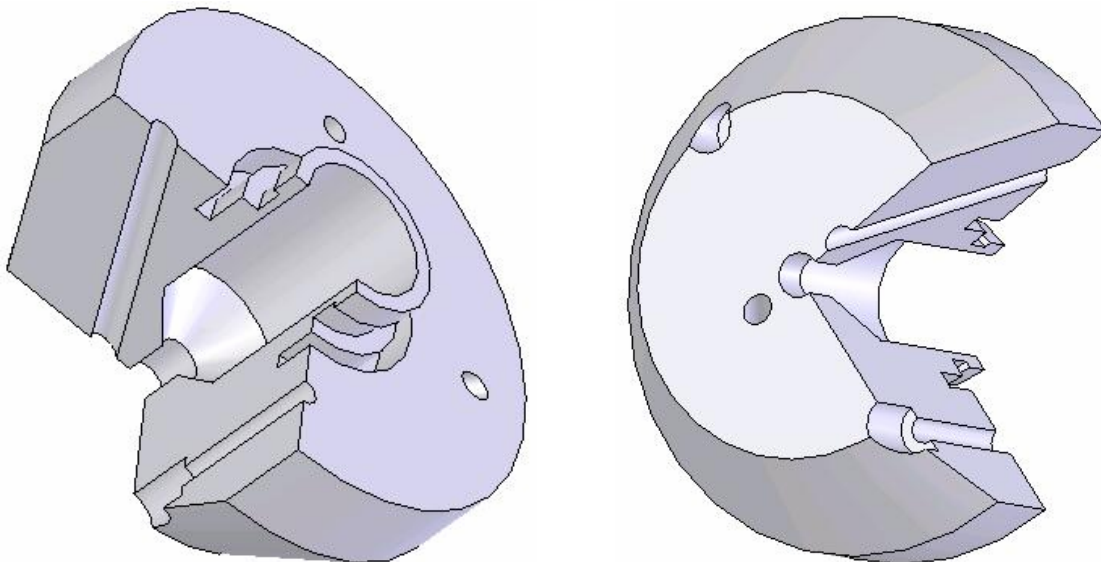
1-Porta bico constritor; 2-Bico constritor; 3-Bocal do gás de proteção; 5-Parafusos; 8-Corpo da tocha PWM-300; 9-Isolante; 10-Eletrodo não consumível; 11-Pinça

Figura 4.6 – Tocha adaptada Processo PTAP

As Figuras 4.7 a 4.12 mostram individualmente os componentes fabricados para a adaptação da tocha. Dentre eles, encontram-se dois bicos constritores com diferentes ângulos de convergência para a saída de pó (30° e 60°), cujo objetivo é permitir quantificar a influência do ângulo de entrada do pó no arco plasma. A Figura 4.7 mostra o bico constritor projetado para um ângulo de saída, do fluxo de pó, de 60°.

No projeto do bico constritor foi considerado o atendimento de varias exigências, tais como, diâmetro do orifício constritor, diâmetro e ângulo de convergência dos orifícios por onde passa o gás de arraste com o pó, necessidade de introduzir um sistema de refrigeração a água (para o qual foi feita uma seleção cuidadosa de anéis de vedação). A utilização de cobre eletrolítico para a confecção deste elemento se deu principalmente em função da grande capacidade de dissipação térmica que possui este material e a de permitir estabelecer e manter um arco entre o eletrodo e este bico constritor (o chamado arco piloto). Quanto ao método de fixação do bico constritor no porta-bico optou-se por dois parafusos (Figura 4.2), de modo a permitir o alinhamento dos orifícios do gás de arraste entre o porta-bico e o bico constritor. O diâmetro do orifício do bico constritor foi projetado para um valor máximo de 4,8 mm, considerando que:

- A largura do revestimento está diretamente relacionada com o diâmetro do orifício do bico constritor;
- A corrente de soldagem fica cada vez mais reduzida à medida em que são utilizados menores diâmetros de orifícios constritores, devido ao aumento de temperatura do arco plasma.
- Diâmetros do orifício do bico constritor superiores a 4,8 mm podem comprometer a abertura do arco piloto.



a) Modelo gerado em CAD



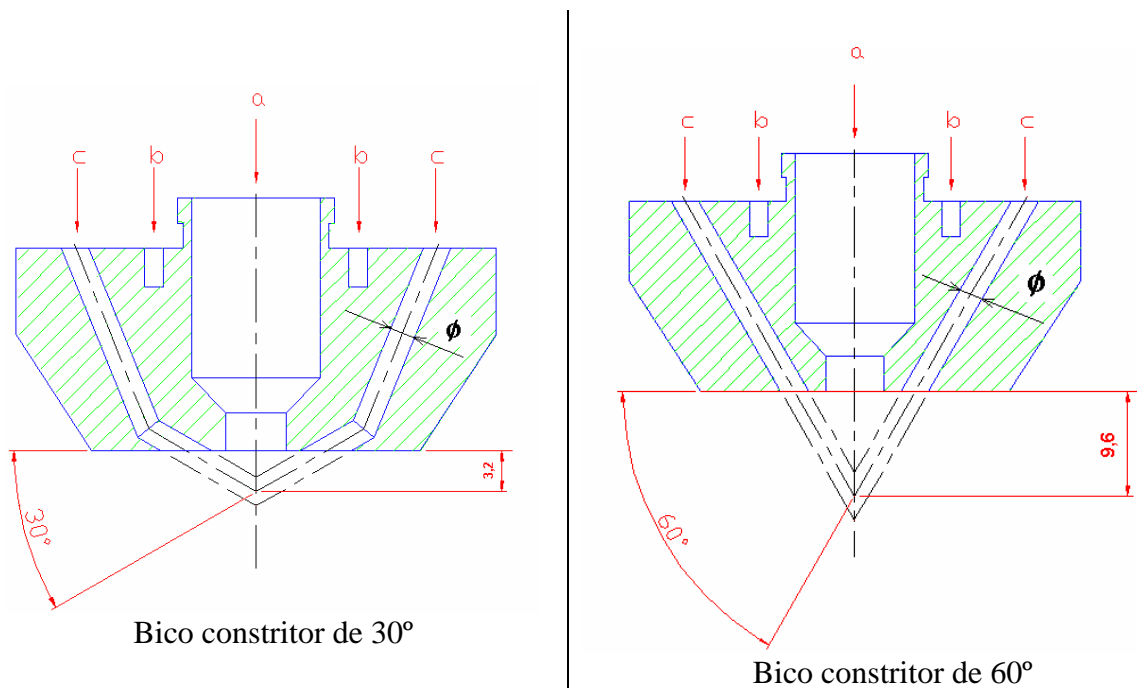
b) Vista superior



c) Vista inferior

Figura 4.7 – a) Modelo do bico constritor gerado em CAD, b) e c) Fotografia do bico constritor fabricado

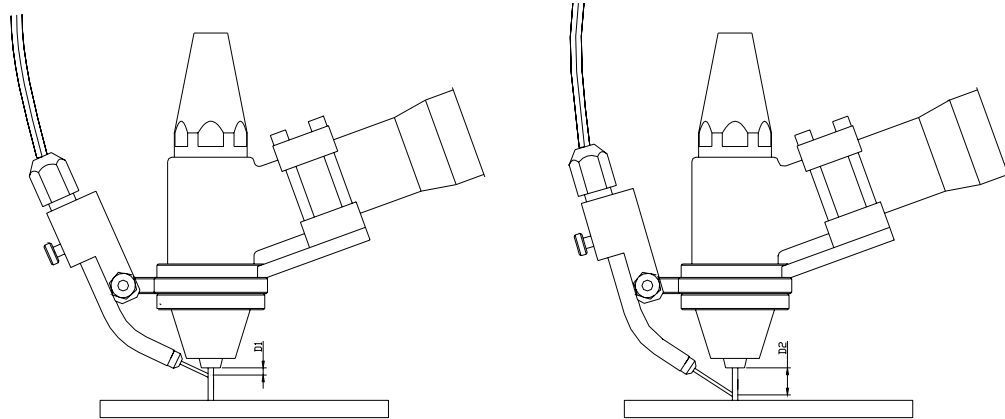
A Figura 4.8 mostra os cortes transversais dos bicos constritores de 30° e 60°. Para evitar o vazamento da água de refrigeração para dentro dos canais de passagem do gás de plasma e gás de arraste são utilizados anéis de vedação “O” ring do tipo 9-2863 (anel original da tocha PWM-300) o qual fica montado segundo a Figura 4.2-item 6.



a - canais para gás de plasma; b - ranhuras para água de refrigeração; c - canais para gás de arraste (Diâmetro=2,0 mm)

Figura 4.8 – Corte transversal do bico constritor de 30° e bico constritor de 60° projetados no LABSOLDA. Medidas em milímetros

Os ângulos de convergência dos canais de passagem do gás de arraste e pó (Figura 4.8 C-C) foram escolhidos em função do critério adotado por Oliveira (2001) usando arame como material de adição. Oliveira (2001) testou dois pontos de intersecção arame/arco, como mostra a Figura 4.9. Na Figura 4.9 a, o arame é direcionado de modo a interceptar o arco a meia altura da distância bico-peça e na Figura 4.9 b o ponto de intersecção corresponde a um ponto da superfície da poça fundida.

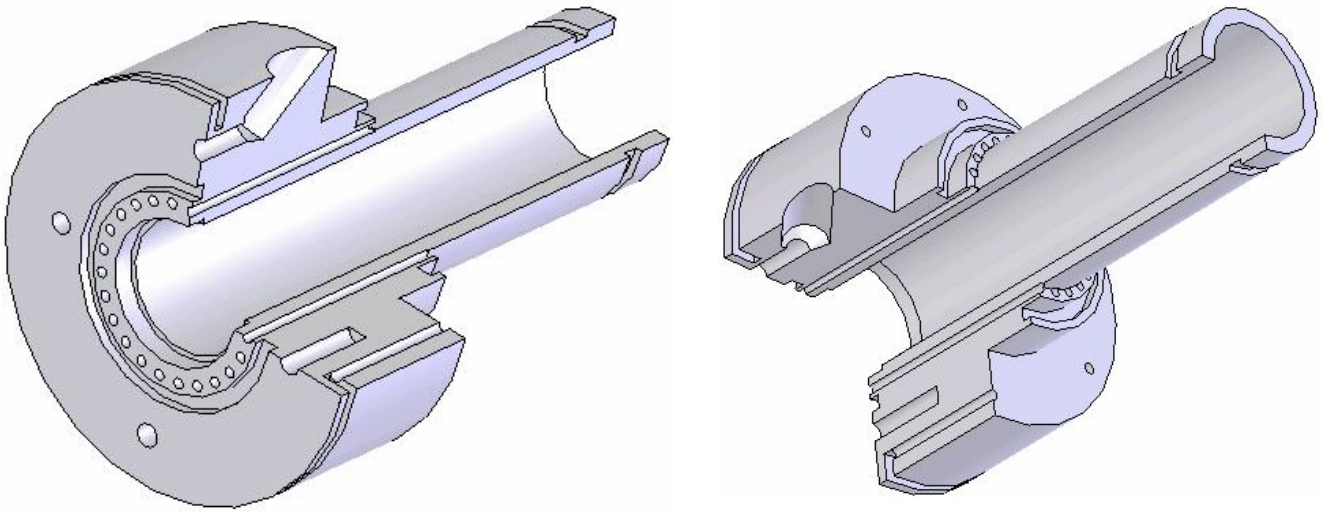


a) Arame direcionado a meia altura

b) Arame direcionado na poça de fusão

Figura 4.9 – Pontos de intersecção arame/arco (Oliveira, 2001)

Na Figura 4.10 é apresentado o porta-bico fabricado. Neste componente é necessário, cumprir vários requisitos, os quais foram considerados durante a concepção do modelo em CAD. O componente deve alojar em forma concêntrica um isolante/distribuidor de gás de plasma e um eletrodo de tungstênio de 4,8 mm de diâmetro. Figura 4.2-itens 9 e 10, respectivamente. Por outro lado, deve permitir a passagem da água de refrigeração até o bico constritor, ter furos para a fixação do bico constritor através de dois parafusos, permitir a passagem do gás de proteção, permitir fixar o bocal de gás de proteção através de rosca, permitir a passagem do gás de arraste com pó e finalmente o componente é fixado na tocha de soldagem através de rosca. Dois anéis de vedação são montados no porta-bico, 2-017 SEAL (a seleção foi feita segundo o catálogo 001-1 BR- SEAL). A função específica destes anéis é evitar o vazamento da água de refrigeração. A montagem dos anéis se explica na Figura 4.2-item 7.



a) Modelo gerado em ambiente CAD



b) Fotografia do Porta Bico fabricado

Figura 4.10 – Modelo do porta-bico gerado em CAD, b) Porta bico fabricado

A Figura 4.11 mostra o bocal de gás de proteção fabricado. Este componente é fixado no porta-bico através de rosca e a função específica é de direcionar o fluxo de gás de proteção. O componente da Figura 4.12 foi projetado para ser rosqueado na tocha e permitir a passagem de fluxo de gás de proteção.



Figura 4.11 – Fotografia do Bocal do Gás de Proteção fabricado



Figura 4.12 – Fotografia da Tampa do Gás de Proteção fabricada

4.1.1.3 Análises dos resultados

Após montagem das peças na tocha, foi realizado o teste de estanqueidade da tocha com o sistema de refrigeração a água funcionando, visando conferir possíveis vazamentos. Depois, foram realizados testes de gás de plasma, gás de proteção e abertura do arco piloto (Figura 4.13). O arco piloto foi mantido aceso por 10 segundos e logo o mesmo teste foi realizado 5 vezes consecutivas para finalmente deixar o arco piloto aceso por 10 minutos. Nestes testes não houve falhas na abertura e o arco piloto mostrou-se bastante estável. O teste da abertura do arco principal foi realizado com uma corrente de 60 A com uma duração de 10 segundos. Neste caso específico foi utilizada uma chapa de cobre refrigerada a água como material de base e foi utilizada uma câmera termográfica para a medição da distribuição de temperaturas na tocha, logo depois de desligar o arco principal. A área selecionada para a medição da

temperatura foi no bico constritor. Finalmente foram realizados ensaios com correntes de 80, 100, 120, 140, 160 e 180 A. Em todos os testes não foi apresentado aquecimento anormal da tocha, atingindo um valor médio de 41° C. A Figura 4.14 mostra o teste da abertura do arco principal. A Figura 4.15 mostra a medição de temperatura da tocha.

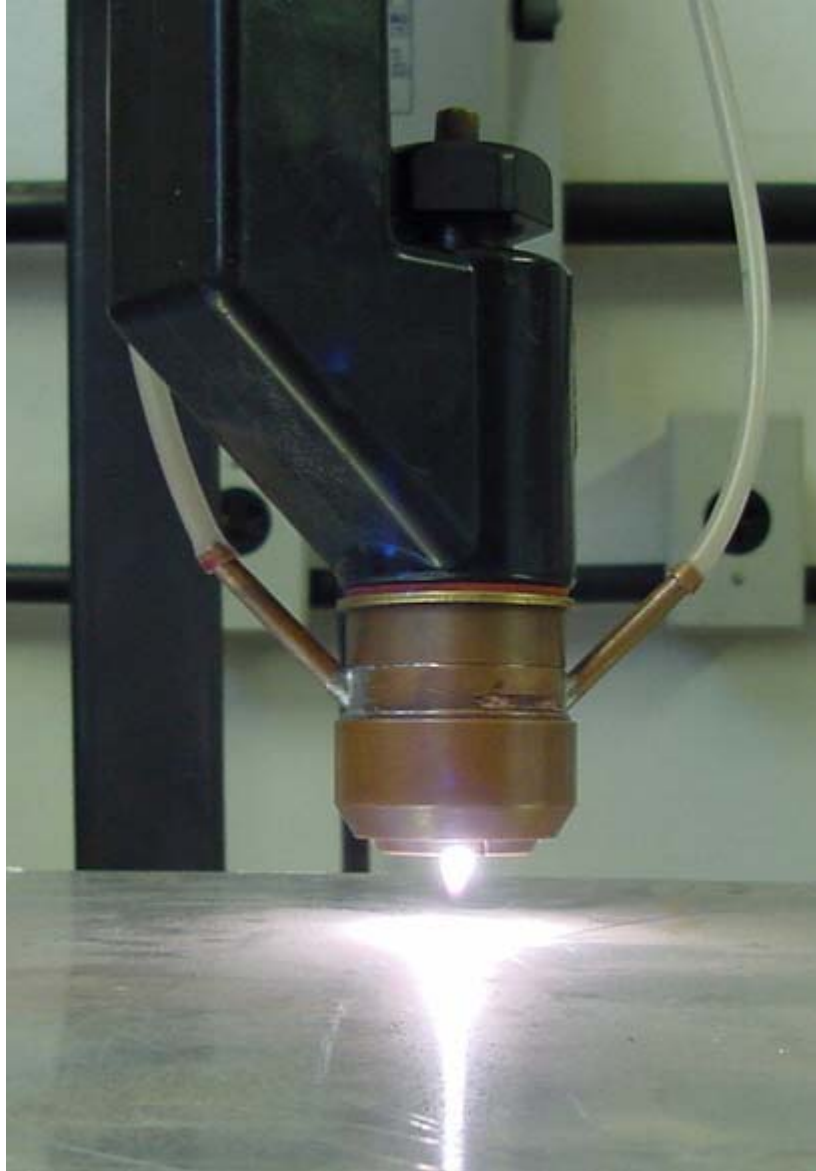


Figura 4.13 – Teste de abertura do Arco Piloto



Figura 4.14 – Teste de abertura do Arco Principal

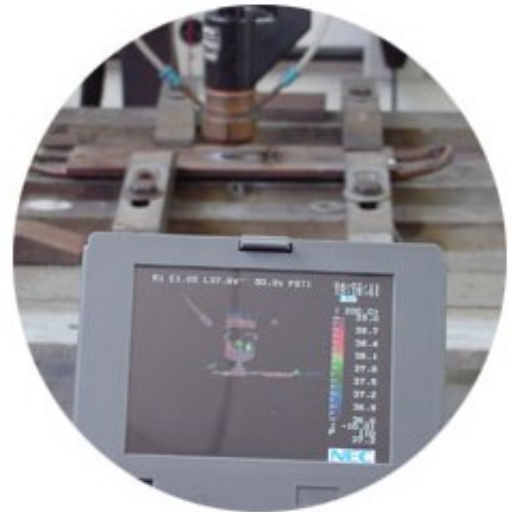


Figura 4.15 – Montagem do equipamento para a medição da temperatura na tocha

4.1.2 Testes de desempenho do alimentador de pó (ADP)

4.1.2.1 Introdução

Quando são utilizados os processos MIG/MAG ou TIG/PLASMA alimentado com arame bobinados de diversas bitolas e materiais, com velocidades constantes ou pulsadas. Já no processo de soldagem Plasma de Arco Transferido PTAP, o consumível é utilizado na forma de pó, e para poder ser transportado até o arco voltaico para produzir sua fusão e deposição é necessário um equipamento específico. A Figura 4.16 mostra o esquema do alimentador de pó utilizado nesta pesquisa, baseado no trabalho realizado por Hallén *et al*, 1991.

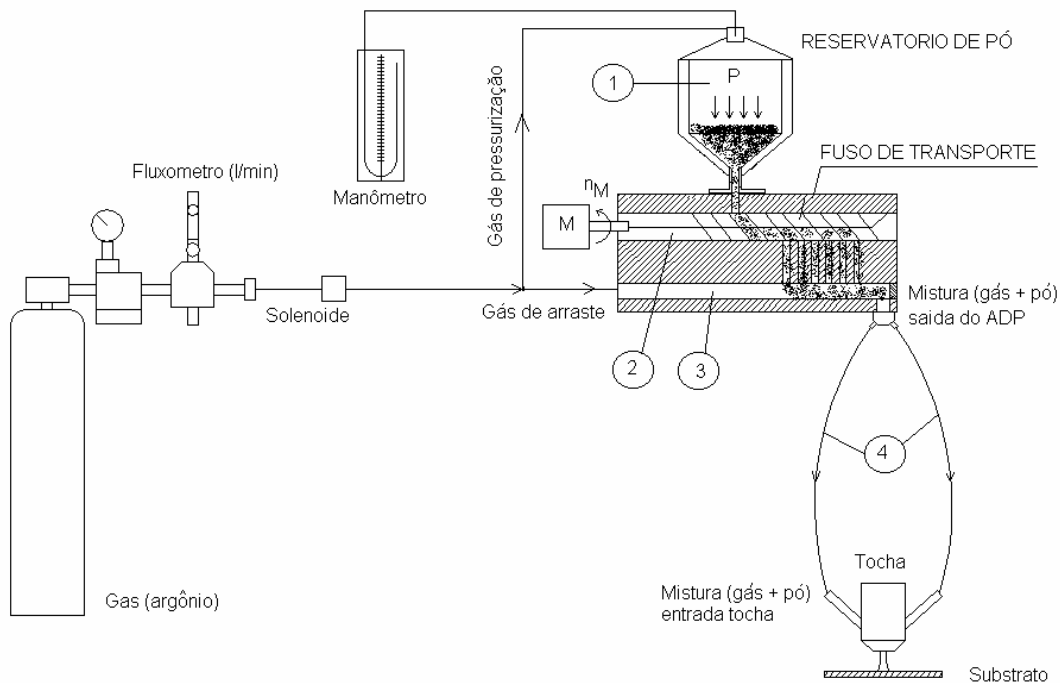


Figura 4.16 – Esquema do alimentador de pó desenvolvido neste trabalho

O aparelho está composto basicamente de:

1. Um reservatório pressurizado para o armazenamento do pó;
2. Um parafuso sem-fim acionado por motor de corrente contínua;
3. Canais para a caída de pó num canal de arraste por gás;
4. Mangueiras flexíveis para transporte de pó até a tocha de soldagem

O parafuso sem-fim define as diferentes taxas de alimentação, considerando que as mesmas estão diretamente relacionadas ao número de rotações por minuto (rpm) do parafuso. O aparelho necessita de dois fluxos de gases para funcionar, denominado como gás de arraste

e gás de pressurização. Observe-se na Figura 4.16 que do cilindro de argônio o gás se divide, através de um “Y”, para pressurizar o reservatório e, por outro lado, para transportar o pó até o arco voltaico. A mistura de pó e gás que sai do alimentador de pó é transportado por duas mangueiras flexíveis até a tocha de soldagem para passar finalmente pelo bico constritor e desta forma poder entrar em forma convergente no arco plasma.

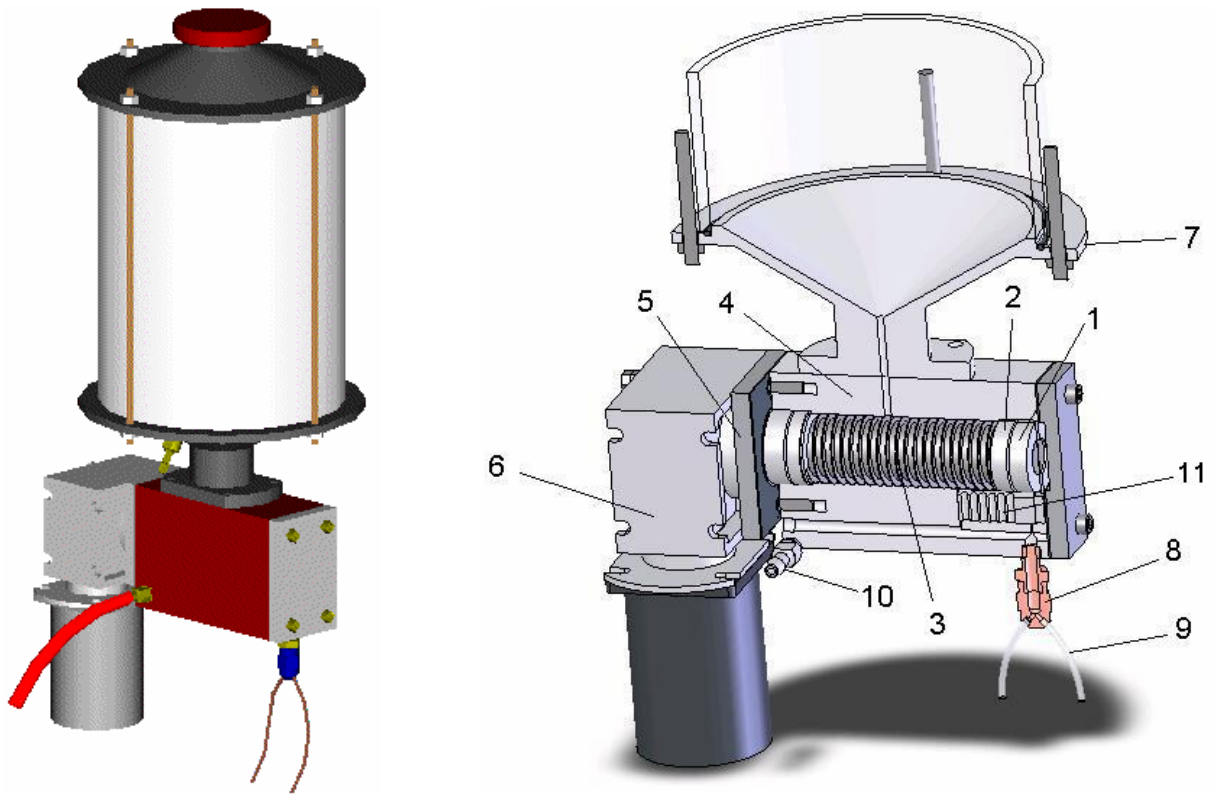
Consultada a literatura técnica especializada, algumas exigências são especificadas (PLASMA TEAM, 2004):

1. O sistema tem que ser preciso e apresentar repetibilidade
2. As características do item 1 são asseguradas através de um sistema de movimentação motorizado
3. Rampas de subida e descida do fluxo mássico de pó para garantir uma sobreposição entre as camadas dos depósitos
4. Controle pelo computador

4.1.2.2 Projeto do alimentado de pó (ADP)

O resultado do estudo realizado direcionaram o desenvolvimento do alimentador de pó para uma concepção baseada no princípio da Figura 4.17. Dentre os diversos modelos gerados em ambiente CAD, identificou-se a concepção que melhor atendeu aos objetivos do projeto, tanto em termos de funcionamento na faixa de operação, quanto na facilidade de fabricação. Nesta concepção, diversos componentes como fuso transportador, reservatório, corpo do alimentador, vedações, rolamentos, motor/reductor tiveram que ser projetados ou selecionados.

A Figura 4.18 mostra a montagem final do equipamento, cujos elementos são descritos a seguir.



1-Vedação, 2-Rolamento, 3-Fuso transportador, 4-Corpo, 5-Tampa, 6-Motor, 7-Base reservatório, 8-Divisor, 9-Mangueiras flexíveis, 10-Entrada gás de arraste, 11-Distribuidor

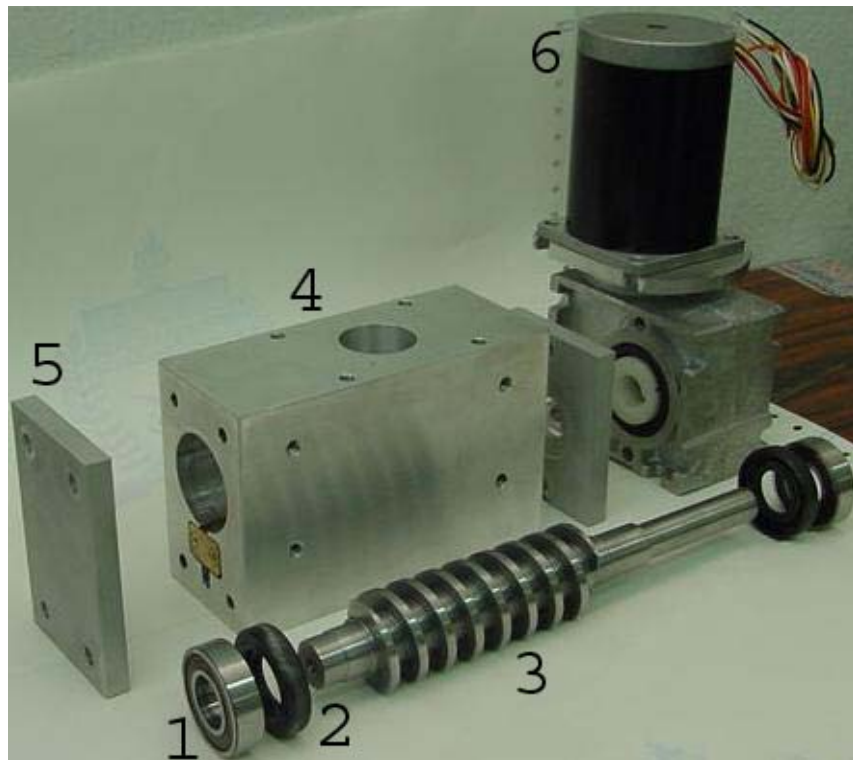
Figura 4.17 – Modelo do Alimentador de Pó gerado em ambiente CAD



Figura 4.18 – Montagem do Alimentador de Pó desenvolvido pelo Labsolda

ROLAMENTOS. O fuso transportador é montado entre dois rolamentos do tipo 600 2 DDU NSK, vedado (Figura 4.19). Na seleção foi considerado que 1) O rolamento trabalha num ambiente com pó (45 a 150 μm), 2) O rolamento trabalha a baixas rotações (0-29 rpm) e 3) o rolamento está submetido a pequenas cargas radiais advindas do próprio peso do fuso transportador.

VEDAÇÕES. A escolha da vedação foi feita através do catálogo de retentores do tipo básicos da SABO. A vedação foi do tipo 00796 BR LI NBR de dimensões 16x32x7mm (Figura 4.19). Trata-se de uma vedação principal de borracha com mola, proteção contra poeira e recoberto externamente de borracha.



*1-Rolamentos, 2-Vedações, 3-Fuso transportador,
4-Corpo, 5-Tampas, 6- motor*

Figura 4.19 – Rolamentos, vedações e motor selecionados. Fuso transportador fabricado

FUSO TRANSPORTADOR. As dimensões do fuso foram especificadas em função da vazão mássica desejada. A vazão mássica pode ser calculada com base na rotação do eixo, o passo do fuso, a área útil de deslocamento, a densidade do pó a transportar e da eficiência, através da seguinte expressão (Spivakovsky, 1970).

$$Q = \eta.n.P.Ad.D \quad (3.0)$$

onde:

Q : Vazão mássica (kg/h)

η : Eficiência

n : Rotação do eixo (rpm)

p : Passo de avanço do helicóide (mm)

A_d : Área útil de deslocamento (mm²)

D : Densidade do pó (g/cm³)

A área útil de deslocamento considerada é determinada pelo diâmetro externo e interno do fuso, calculada pela expressão:

$$A = \frac{\pi}{4} (De^2 - Di^2) \quad (4.0)$$

onde:

De: Diâmetro externo do fuso (mm)

Di : Diâmetro interno do fuso (mm)

Foram projetados dois fusos transportadores. O primeiro fuso projetado foi fabricado em aço 1020, com passo de 10 mm e espessura do filete de 3 mm. Figura 4.20. Com ele foram realizados alguns ensaios sem abertura do arco principal e foi observado que na ponta da tocha o pó se apresentava com uma alimentação descontínua, associado ao tamponamento dos canais de caída pelo filete do fuso. A primeira decisão foi reduzir a espessura do filete (0,2 mm), o que foi acompanhado por uma redução do passo do fuso para 4 mm. A Figura 4.21 mostra o segundo parafuso sem-fim projetado. Na escolha do material definitivo para confeccionar o fuso foi considerado o desgaste abrasivo, decidindo-se fabricar o fuso em aço VC-131 (Norma Villares) equivalente ao D6 (Norma AISI), devido a que este tipo de material apresenta maior resistência ao desgaste quando comparado com o aço 1020. O aço D6 é amplamente utilizado na fabricação de ferramentas de corte (matrizes e punções), ferramentas para forjamento a frio, cilindros para a laminação a frio, rolos para perfiladoras de tubos, lâminas para cortadores de plástico, madeira e chapas metálicas finas.

Este é um aço para trabalho a frio, de elevada temperabilidade, alta resistência mecânica, alta resistência ao desgaste e boa tenacidade. A dureza superficial, na condição temperada e revenida, pode alcançar 62 Rc. A Tabela 4.1, mostra a sua composição química.

Tabela 4.1 – Composição química nominal do aço AISI D6

AISI	C	Mn	P max.	S máx.	Si	Cr	W	V
D6	2,00-2,25	0,20-0,60	0,030	0,030	0,20-0,40	11,00-13,00	0,80-1,25	0,15-0,30

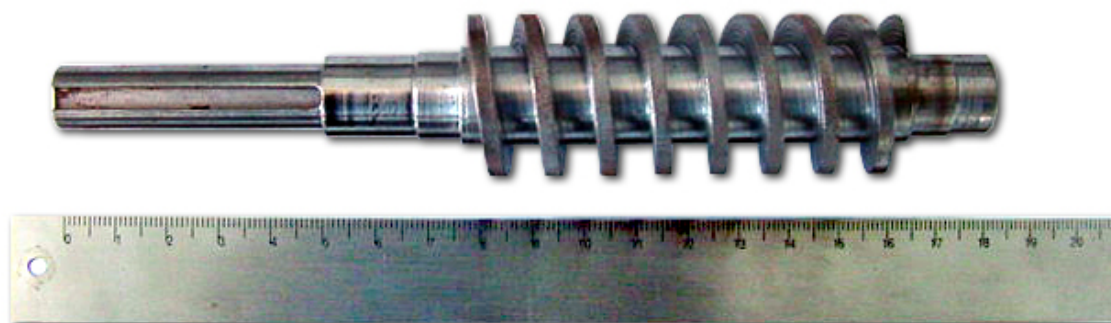


Figura 4.20 – Fuso transportador. Passo=10 mm

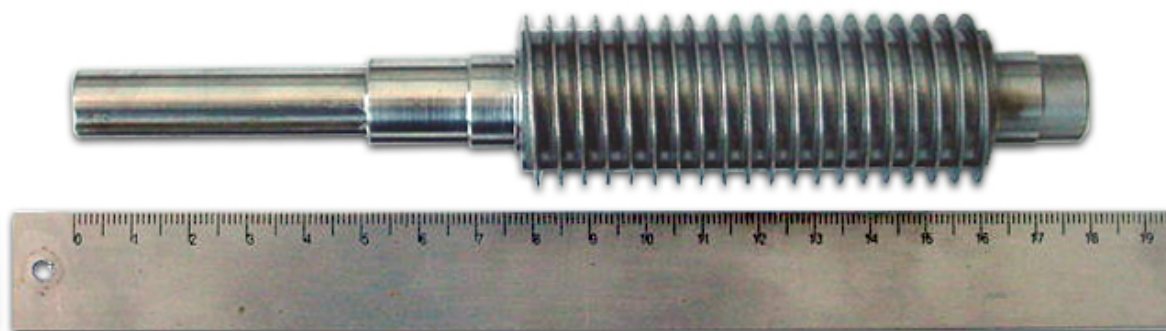


Figura 4.21 – Fuso transportador. Passo=4mm

Para escolher a velocidade de giro do fuso transportador, é necessário antes relacioná-la com a taxa de alimentação (kg/h) da liga específica que vai ser alimentada. Essa função transferência pode ser levantada de forma simples: Para cada velocidade do fuso (em rpm) é pesada a quantidade de pó transportado em um determinado tempo, com auxílio de uma balança de alta resolução (0,1 mg). As curvas apresentadas nas Figuras 4.22 e 4.23 correspondem aos dois fusos projetados. A Figura 4.24 mostra o Alimentador de Pó em vista explodida.

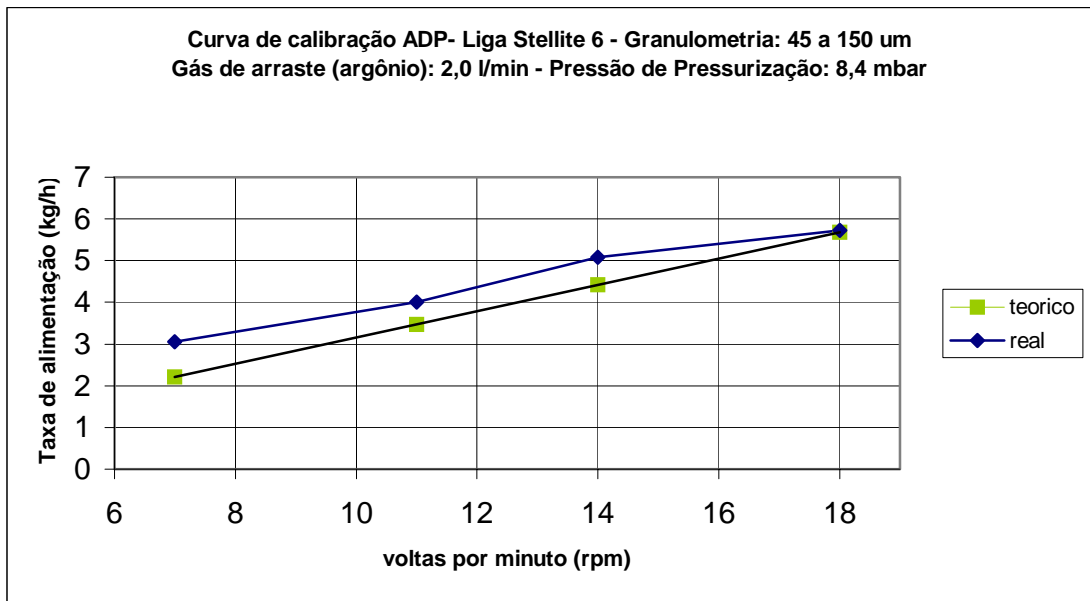


Figura 4.22 – Função transferência correspondente ao fuso de passo $p = 10$ mm

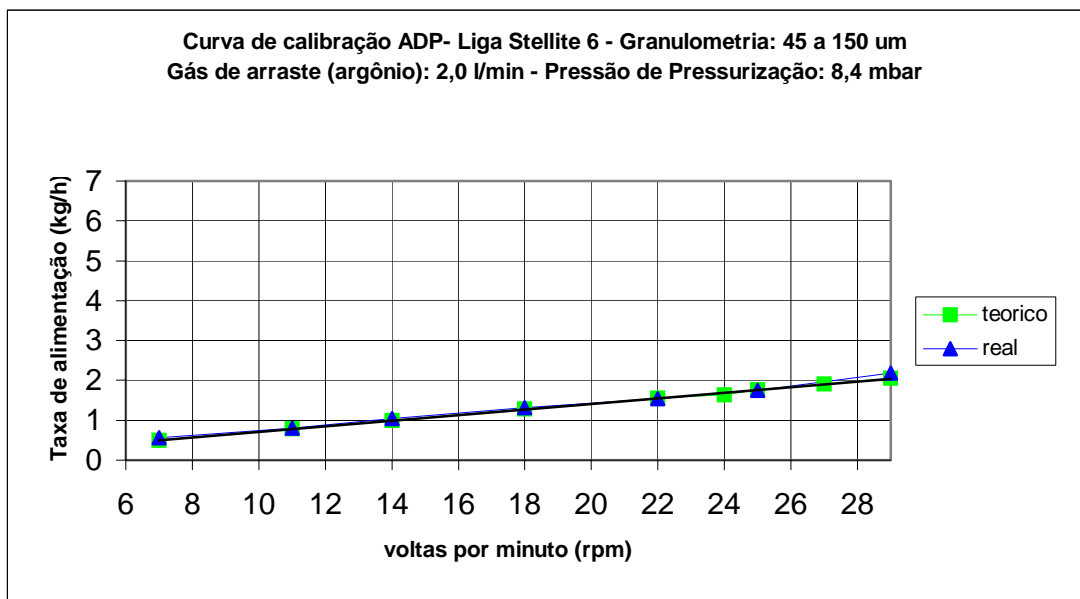


Figura 4.23 – Função transferência correspondente ao fuso de passo $p = 4$ mm

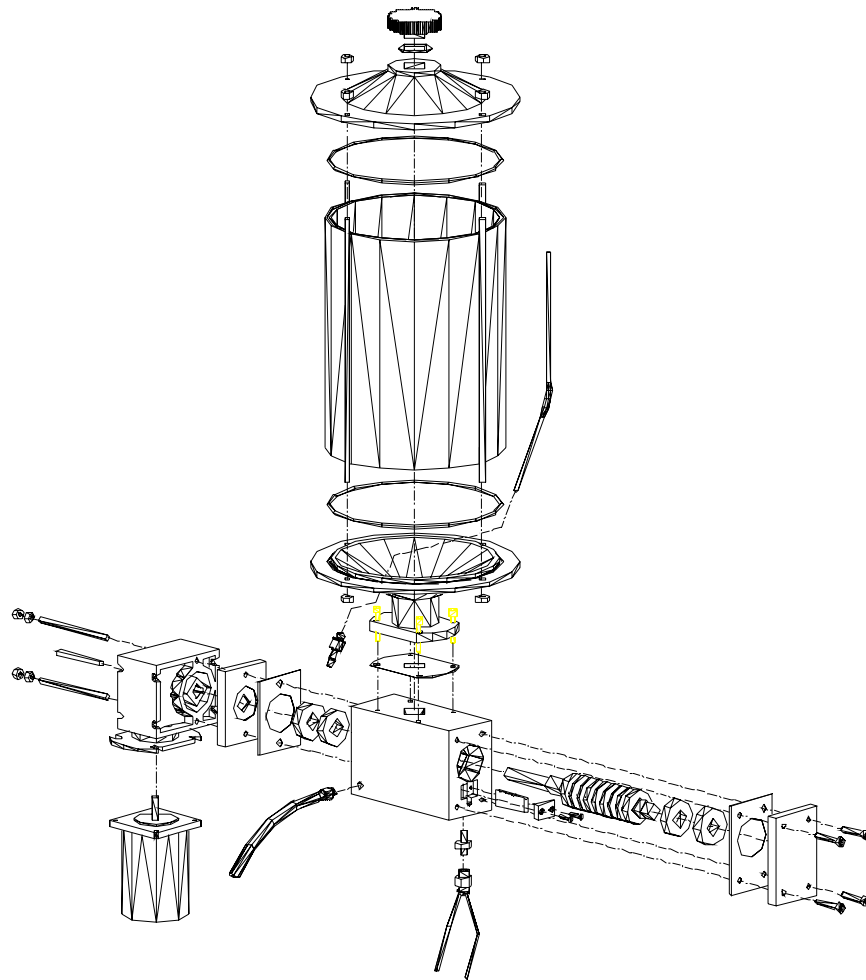


Figura 4.24 – Alimentador de Pó em vista explodida

4.1.2.3 Análises dos resultados

O teste de desempenho do alimentador de pó foi realizado nas condições de soldagem indicadas na Tabela 4.2. A avaliação foi feita através do aspecto superficial dos depósitos. Realizaram-se testes sobre chapas de aço carbono da classe ABNT 1020. Essas foram cortadas nas dimensões de 12,5x60x155mm e esmerilhadas para a remoção da camada de óxido. O material de aporte utilizado foi a liga Stellite 6, em forma de pó.

Tabela 4.2 – Variáveis e parâmetros de soldagem-Desempenho do ADP

Variáveis		
Corrente de soldagem	I(A)	160
Velocidade de soldagem	Vs(cm/min)	20
Gás de plasma	VGP(l/min)	2,4
Gás de proteção	GPr(l/min)	10
Gás de arraste	GTr(l/min)	2
Taxa de alimentação	Tx(kg/h)	3
Voltas por minuto	rpm	7
Diâmetro do bico constritor/ângulo de convergência	d(mm)/(°)	4,8/30
Distância bico-peça	DBP(mm)	10
Recuo	Rc(mm)	2,4

Os cordões realizados com o fuso transportador de 10 mm de passo apresentaram irregularidades geométricas em toda a sua extensão (Figura 4.25a), devido principalmente à não uniformidade na alimentação de pó.

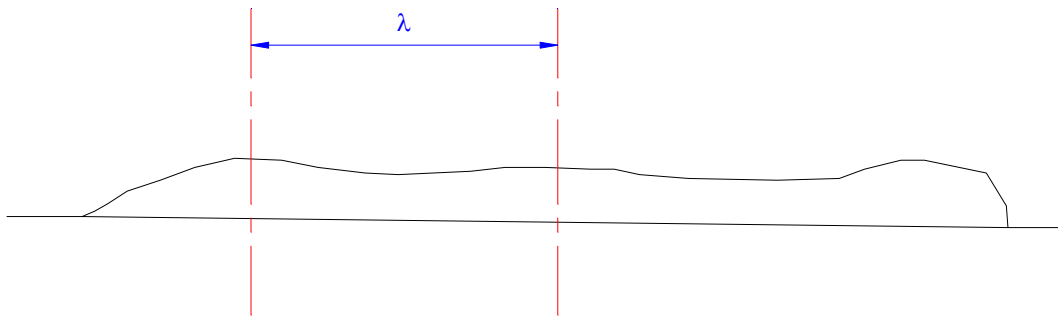


TOPO



PERFIL

a – Vista de topo e perfil do cordão



b – Distância entre duas cristas consecutivas

Figura 4.25 – Aspecto visual do depósito. Fuso transportador com $p = 10$ mm.

Na Figura 4.25a observa-se que o perfil do cordão apresenta uma tendência periódica. A distância entre as duas cristas consecutivas foi medida como mostra o desenho da Figura 4.25b, obtido da fotografia do perfil da Figura 4.25a. Com base na velocidade de soldagem

utilizada (20 cm/min) foi determinado o período que corresponde à distância λ e, com ele, a frequência.

$$V_s = \frac{\lambda}{T} \quad (5.0)$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{V_s}{\lambda} \quad (6.0)$$

onde V_s : Velocidade de soldagem

Sabendo que: $V_s=20$ cm/min e $\lambda=28$ mm obteve-se o valor da frequência $f = 0,12$ Hz

Essa frequência corresponde à velocidade de giro do fuso (7 rpm), pelo qual pode ser afirmado que a irregularidade do cordão está ligada com a obstrução dos canais de caída do pó pelo filete do parafuso. Assim sendo, foi projetado um novo fuso transportador com uma espessura mínima de 0,2 mm. Para manter inalterado o espaço dos canais, foi reduzido o passo para 4 mm. Os testes realizados com o segundo fuso projetado deram bons resultados, apresentando um revestimento sem variações na geometria em toda a sua extensão (como mostra a Figura 4.26)



Figura 4.26 – Aspecto visual do depósito. Fuso transportador $p = 4$ mm.

A Figura 4.27 mostra a relação entre a taxa de alimentação de pó e gás de arraste, para o fuso transportador com passo de 4 mm. A curva foi levantada com o intuito de verificar o comportamento da taxa de alimentação de pó quando são utilizadas diferentes vazões de gás de arraste.

Os resultados eram esperados, devido a que a taxa de alimentação de pó é definida pelo fuso transportador e não pelo gás de arraste. Para os quatro valores de vazão de gás de arraste selecionados a taxa de alimentação de pó se manteve constante (Para 1,2 e 1,7 kg/h). Quando foram empregados valores de vazão de gás de arraste menores que 2,0 l/min foi observado que ficou pó sem ser transportado.

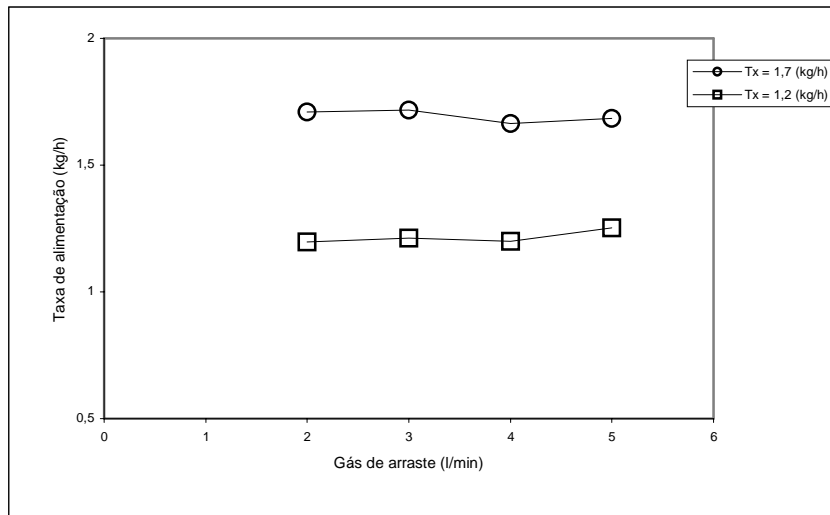


Figura 4.27 – Relação entre a taxa de alimentação e o gás de arraste

4.2 Procedimentos na posição plana

4.2.1 Análise da influência da vazão do gás de arraste sobre o arco plasma

4.2.1.1 Introdução

O estudo se direciona no sentido de se verificar a influência da vazão do gás de arraste sobre o arco plasma. Foi verificado que o gás de arraste afeta na abertura do arco principal. Procedeu-se a realizar algumas modificações nos equipamentos para dar continuidade nos experimentos. Em uma segunda etapa procurou-se verificar o comportamento da tensão do arco induzido pelo fluxo do gás de arraste empregando-se os bicos constritores de 30 e 60°. Finalmente foi verificada a influência da posição da tocha de soldagem sobre os cordões de solda.

4.2.1.2 Procedimento experimental

Para a execução destes ensaios, optou-se pela utilização de uma chapa de cobre refrigerada a água, como material de base (250x65x6 mm), na qual o arco era aberto. Desta maneira é possível manter o arco aberto e com a manutenção da distância bico-peça constante por longos períodos de tempo. Realizaram-se ensaios com os parâmetros indicados na Tabela 4.3, onde se fixou como variável de análise o fluxo de gás de arraste e tipo de bico constritor.

Na análise da posição da tocha de soldagem realizaram-se depósitos sobre chapas de aço carbono da classe ABNT 1020. Essas foram cortadas nas dimensões de 12,5x60x155mm e esmerilhadas para a remoção da camada de óxido. Foi utilizado como material de aporte a liga Stellite 6, em forma de pó.

Tabela 4.3 – Variáveis e Parâmetros de soldagem-Análise do gás de arraste sobre o arco plasma

Variáveis		
Corrente de soldagem	I(A)	160
Velocidade de soldagem	Vs(cm/min)	0
Gás de plasma	VGP(l/min)	2,4
Gás de proteção	GPr(l/min)	10
Gás de arraste	GTr(l/min)	0, 2, 4, 6
Gás de plasma/Gás de proteção/Gás de arraste		Ar
Taxa de alimentação	Tx(kg/h)	0
Diâmetro do bocal constritor/ângulo de convergência	d(mm)/(°)	4,8/30° e 60°
Distância bico-peça	DBP(mm)	10
Recuo	Rc(mm)	2,4

4.2.1.3 Análises dos resultados

4.2.1.3.1 Influência do gás de arraste sobre o arco plasma

O arco piloto exerce fundamental importância no estabelecimento do arco transferido. O jato de plasma gerado pelo arco piloto se torna uma espécie de condutor elétrico conectando o substrato e o eletrodo de tungstênio (Figura 4.28a).

Devido ao fato do eletrodo permanecer totalmente envolto pelo bico constritor, não se pode abrir o arco por contato, tornando-se então indispensável a utilização de um equipamento denominado de MODULO PLASMA. Usa-se um sistema composto por um circuito, que gera pulsos de alta tensão (4000 V) em curta duração (4 μ s) para produzir a ionização da região situada entre a ponta do eletrodo e o bico constritor. Quando isto ocorre, abre-se um pequeno arco entre o eletrodo de tungstênio e o bico constritor, denominado arco piloto, uma vez que existe uma pequena fonte de energia auxiliar ligada entre estes dois elementos. A corrente do arco piloto é ajustada em torno de 14 A, pois este valor é suficiente para abrir o arco e garante a integridade do bico constritor (Paula Jr, 1997; Vergara *et al*, 1999; Oliveira, 2001).

Neste estudo observou-se que, aberto o arco piloto, o arco principal ficava difícil de ser iniciado simultaneamente com a alimentação do gás de arraste, uma vez que o fluxo do gás de

arraste que entra em forma convergente no arco plasma produz um efeito de isolamento entre o substrato e o jato plasma (é como se os jatos de gás de arraste cortassem o jato plasma), impedindo a abertura do arco principal (Figura 4.28b).

Para solucionar este tipo de problema, foram analisadas duas alternativas: A primeira solução consistiu em aumentar a corrente do arco piloto de 14 para 100 A (Mekideche , 1989; Hallén *et al*, 1991), para tornar o jato plasma mais rígido, ou seja, fica menos sensível aos efeitos produzidos pelos jatos do gás de arraste. Este tipo de solução requer modificações no módulo plasma, principalmente na fonte de energia auxiliar ligada entre o bico constritor e o eletrodo de tungstênio. A segunda solução consistiu em provocar um retardo entre a abertura do arco principal e o fluxo de gás de arraste, ou seja, de forma que somente após o arco principal estiver estabilizado a vazão do gás de arraste seria iniciada. Tal retardo é possível de controlar através de uma válvula solenóide, Figura 4.29, localizada na saída do fluxómetro, a qual, através de um circuito eletrônico desenvolvido especificamente para esta pesquisa, recebe um sinal de tensão (proveniente da fonte Inversal) quando há corrente de soldagem e, em seguida, espera um tempo, que deve ser programado, para iniciar a abertura da válvula solenoide. A Figura 4.30 mostra, no ciclo de soldagem, a defasagem t_{iGtr} entre as variáveis corrente de soldagem e gás de arraste. O tempo da defasagem programado nesta pesquisa foi de 2 segundos.

Esta última solução foi a implementada devido a que não requer modificações nos equipamentos existentes e considerando-se que valores de corrente na ordem de 100 A podem comprometer o bico constritor.

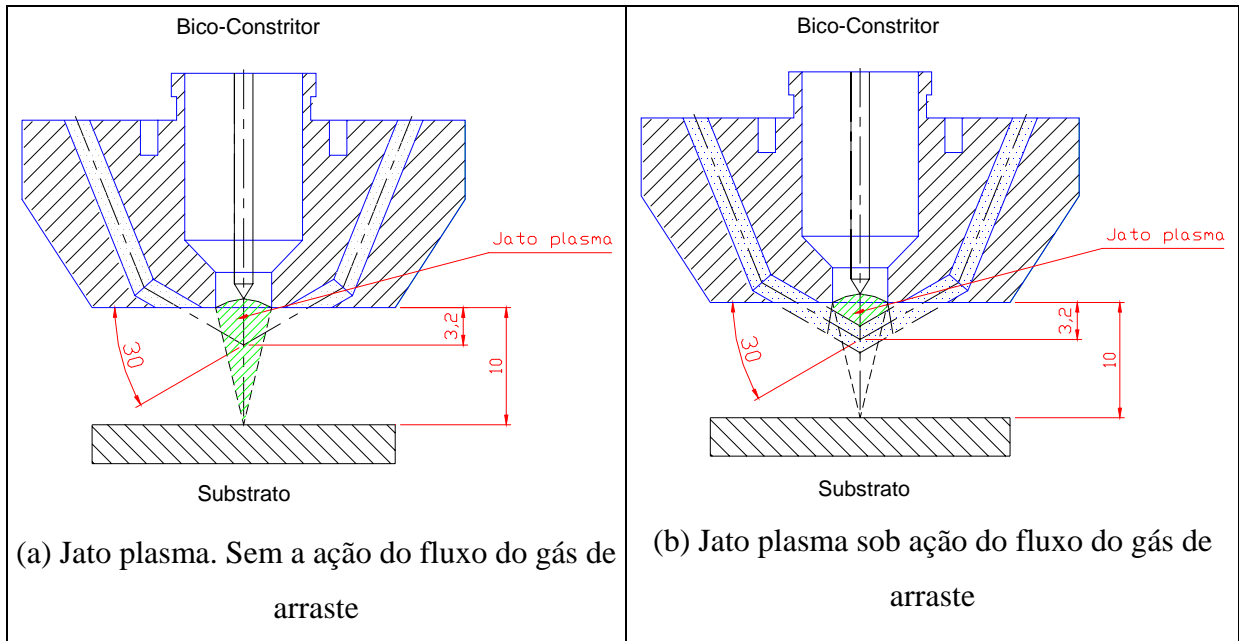
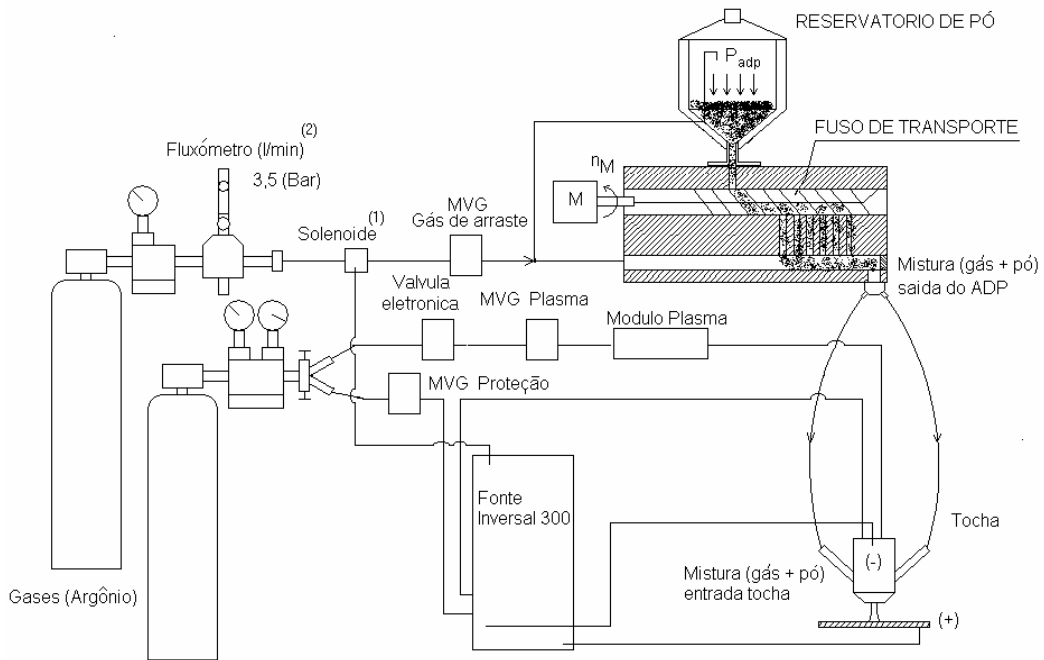


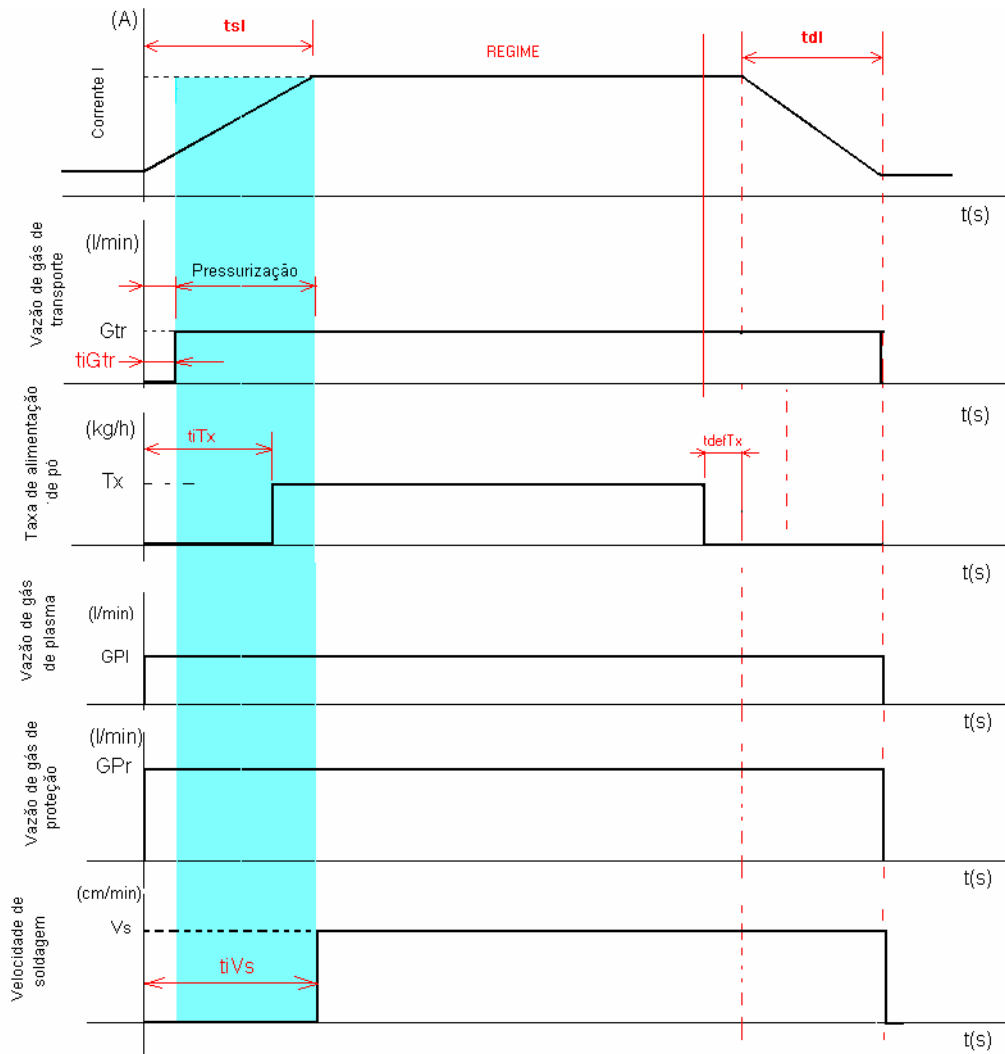
Figura 4.28 – Efeito da ação dos fluxos do gás de arraste sobre o gás ionizado



Padp: Pressurização, nM: voltas por minuto, M: Motor/redutor

MVG: Medidor da vazão de gás, ADP: Alimentador de pó

Figura 4.29 – Diagrama dos gases utilizados no processo. Gás de arraste, pressurização, plasma e proteção



t_{sI} : Tempo de subida da corrente; t_{dI} : Tempo de descida da corrente; I: Corrente de soldagem; G_{Tr} : Gás de arraste; T_x : Taxa de alimentação; G_{PI} : Gás de plasma; G_{Pr} : Gás de proteção; V_s : Velocidade de soldagem; t_{iVs} : Tempo inicio da velocidade de soldagem; t_{iGr} : Tempo de inicio do gás de arraste; t_{iTx} : Tempo de inicio da taxa de alimentação de pó; t_{defTx} :

Defasagem na alimentação de pó

Figura 4.30 – Diagrama do ciclo de soldagem

As variáveis que definem o ciclo de soldagem da Figura 4.30 podem ser controladas através de um programa (software) de gerenciamento específico do processo de soldagem PLASMA PTAP. O programa permite programar valores em regime da corrente de soldagem (I), vazão de gás de plasma (G_{PI}), taxa de alimentação (T_x) e velocidade de soldagem (V_s). Por outro lado, são programadas as rampas de subida (t_{sI}) e descida (t_{dI}) da corrente de soldagem como também as variáveis de defasagem em relação à corrente de soldagem: Velocidade de soldagem (t_{iVs}), taxa de alimentação inicio (t_{iTx}) e fim (t_{defTx}).

Em uma segunda etapa procurou-se verificar o comportamento da tensão do arco induzido pelo fluxo do gás de arraste. Para a execução destes ensaios, optou-se pela utilização de uma chapa de cobre refrigerada a água, como material de base, na qual o arco era aberto. Desta maneira é possível manter o arco aberto durante longos períodos com uma distância bico-peça constante. Foram realizados ensaios, onde se fixou como variável de análise a vazão de gás de arraste e o tipo de bico constritor.

A Figura 4.31, apresenta o comportamento da tensão do arco em função da vazão do gás de arraste. Os níveis de tensão do arco para o bico de 60° se manteve praticamente constante devido a que o gás de arraste incide na região junto ao material de base, caso que não acontece quando é utilizado o bico de 30°. Neste ultimo caso, o gás de arraste entra no arco a 3,2 mm medidos desde a face externa do bico constritor, produzindo o efeito de constrição do arco plasma.

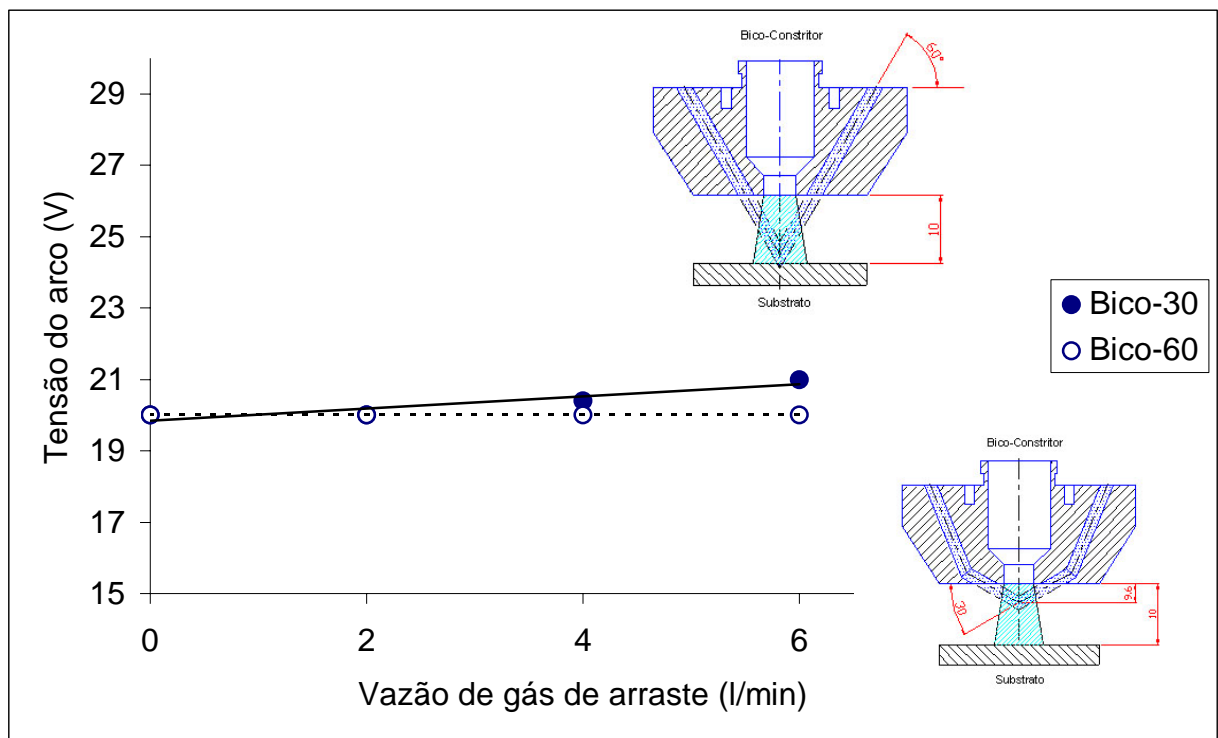


Figura 4.31 – Comportamento da tensão do arco em função do gás de arraste

4.2.1.3.2 Análises da posição da tocha de soldagem.

A posição da tocha de soldagem influencia sobre o aspecto superficial e qualidade do revestimento. A tocha é posicionada considerando como referência os orifícios de fluxo de gás de arraste, localizados na face externa do bico constritor, em um diâmetro concêntrico de 15 mm, em relação ao orifício constritor. A análise considera o estudo de duas configurações da posição da tocha:

- O fluxo do gás de arraste está no plano XZ, Figura 4.32
- O fluxo do gás de arraste está no plano YZ, Figura 4.33

A Figura 4.32 mostra o aspecto superficial e seção transversal dos revestimentos depositados com um bico constritor de 30 e 60°. Nesta posição da tocha de soldagem, o fluxo do gás de arraste está no plano OXZ, ou seja, o fluxo do gás e pó entram pelas laterais do cordão de solda e o resultado é um cordão com uma forma geométrica irregular. O depósito feito com um bico constritor de 60°, apresentou uma largura menor que aquele com um bico constritor de 30°. Pode ser, simplesmente, que o gás de arraste passa a resfriar diretamente a poça fundida diminuindo assim o molhamento.

A Figura 4.33 mostra o aspecto superficial e seção transversal dos cordões realizados com um bico constritor de 30 e 60°, considerando que o fluxo do gás de arraste, está no plano OYZ. Nesta posição da tocha, o fluxo do gás de arraste e pó estão no mesmo plano da direção de soldagem, ou seja, os dois furos que permitem a passagem do gás de arraste, estão alinhados em relação à direção de soldagem. Embora a penetração ter sido mais uniforme nas soldagens realizadas com os furos dispostos transversalmente, a irregularidade e acabamento do cordão foi melhor com os furos dispostos na direção de soldagem.

A configuração do bico constritor desenvolvida neste trabalho inclui dois conduítes de passagem de gás de arraste, cujo objetivo é de alimentar com pó o arco plasma, em forma convergente. Entretanto Mekideche (1989) apresenta uma configuração de tocha na qual a alimentação de pó é por um único conduíte, representado esquematicamente na Figura 4.34.

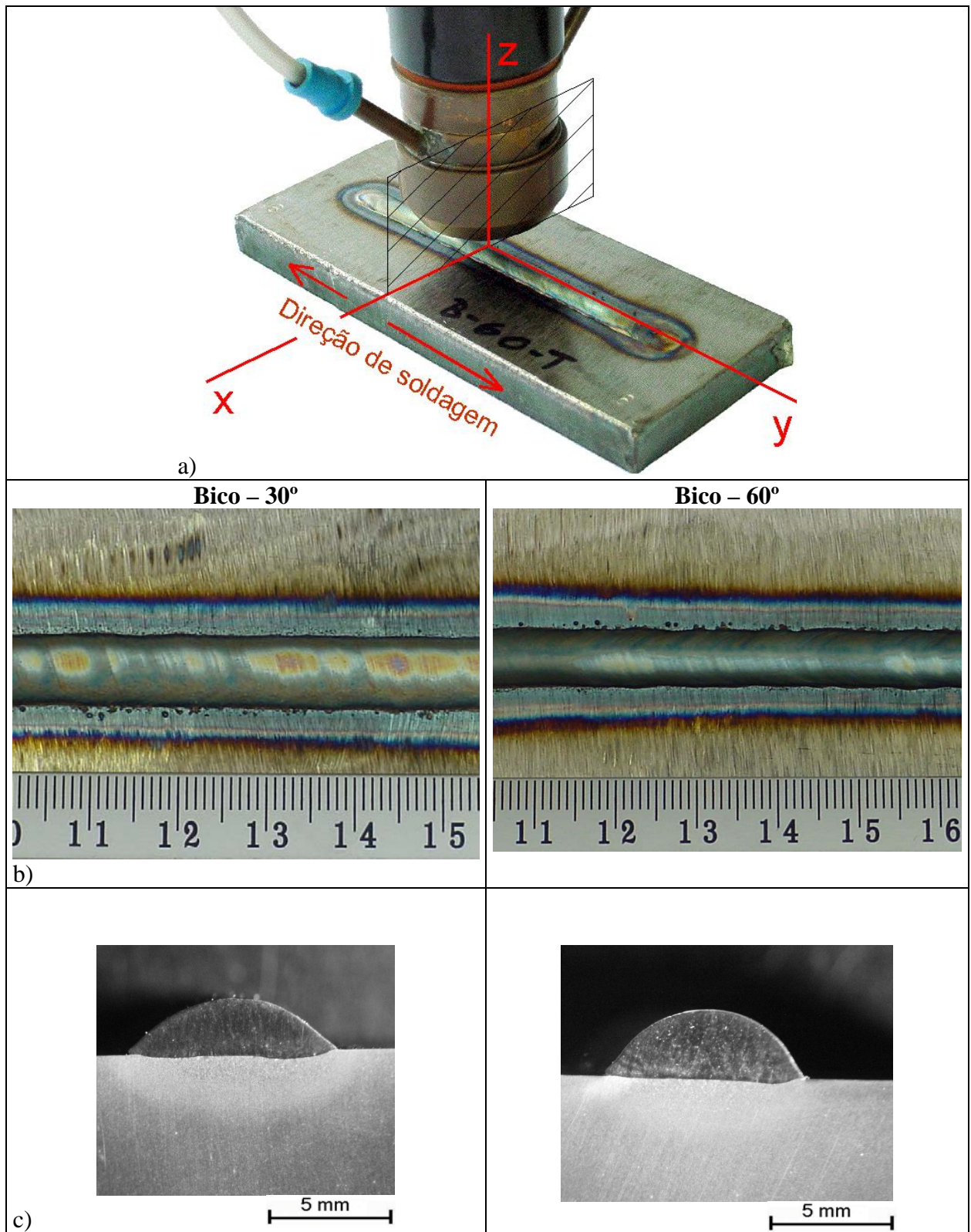
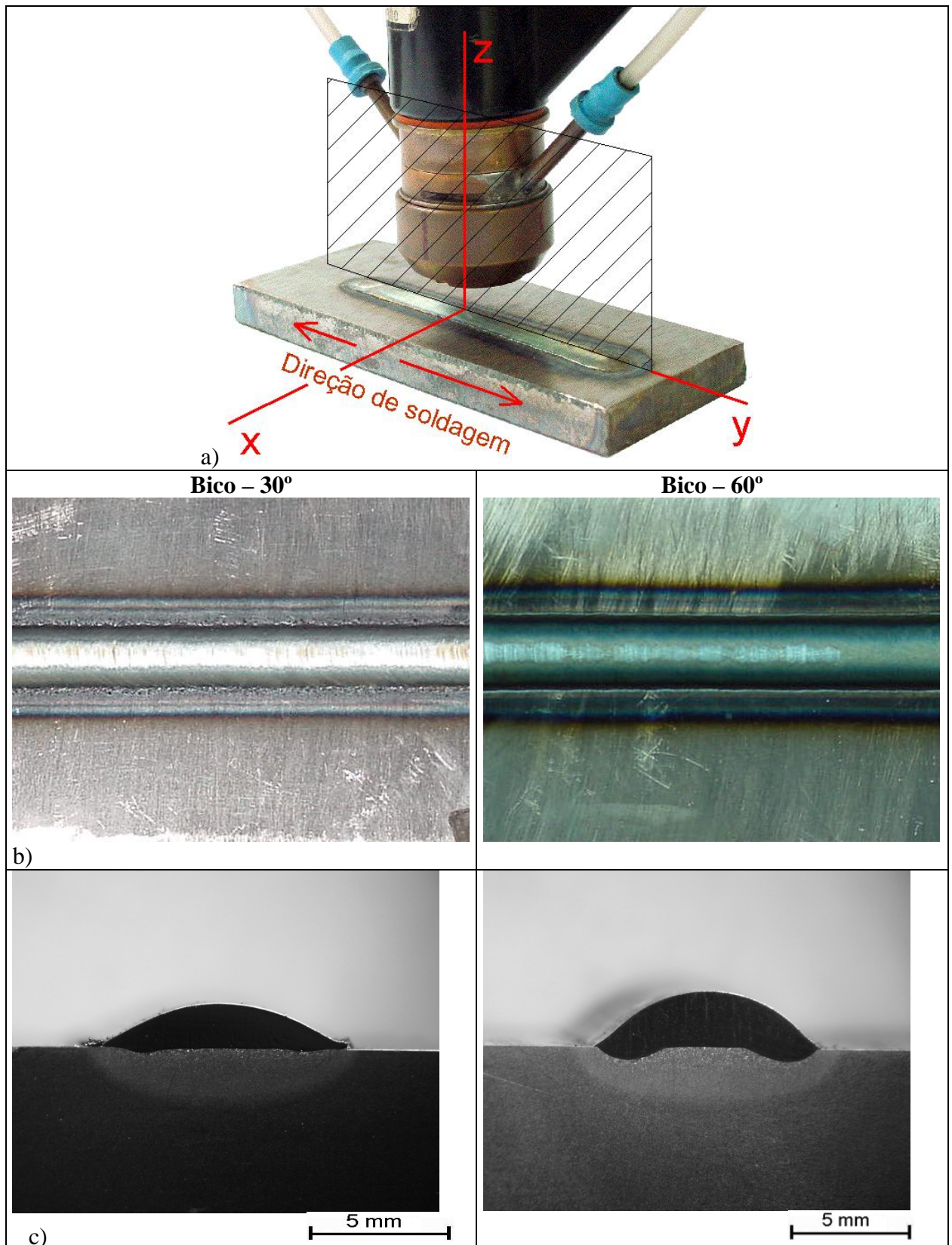


Figura 4.32 – a) Fluxo do gás de arraste localizado no plano OXZ. Direção de soldagem perpendicular ao plano OXZ.
 b) Aspecto superficial dos cordões.
 c) Seções transversais dos cordões



$I = 160 \text{ A}$, $V_s = 20 \text{ cm/min}$, $T_x = 1,17 \text{ kg/h}$

Figura 4.33 – a) Velocidade de soldagem paralela ao plano OXZ. Orifícios do fluxo de gás de arraste alinhados em relação à velocidade de soldagem
 b) Aspecto superficial dos cordões
 c) Seções transversais dos cordões

Neste caso o gás de arraste produz uma deflexão do arco plasma e, como consequência, a penetração do depósito foi menor. Mekideche (1989) utilizou correntes de soldagem entre 100 e 140 A com uma taxa de alimentação variando entre 3 e 6,5 g/min (0,18 – 0,39 kg/h) e os depósitos foram conduzidos com velocidades de soldagem na faixa de 4 a 6 cm/min. Os valores de diluição variaram entre 33 e 60%.

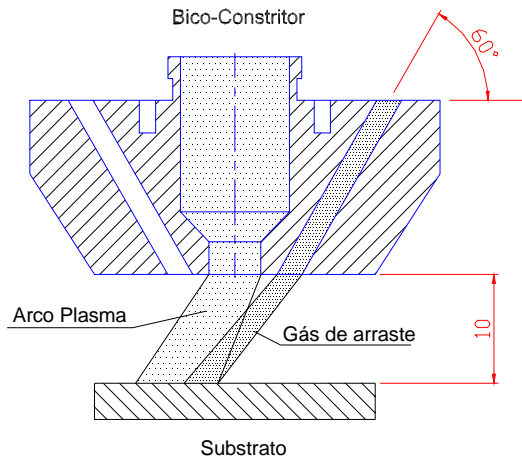


Figura 4.34 – Efeito do gás de arraste sobre o arco plasma utilizando um único condúite de alimentação de pó (Mekideche, 1989).

Para confirmar as afirmações de Mekideche (1989), foram realizados alguns ensaios com registro fotográfico do arco. A Figura 4.35 mostra o efeito do gás de arraste sobre o arco plasma utilizando-se um único condúite de alimentação de pó. Na Figura 4.35 é possível observar a entrada de pó no arco plasma e uma pequena deflexão do arco.

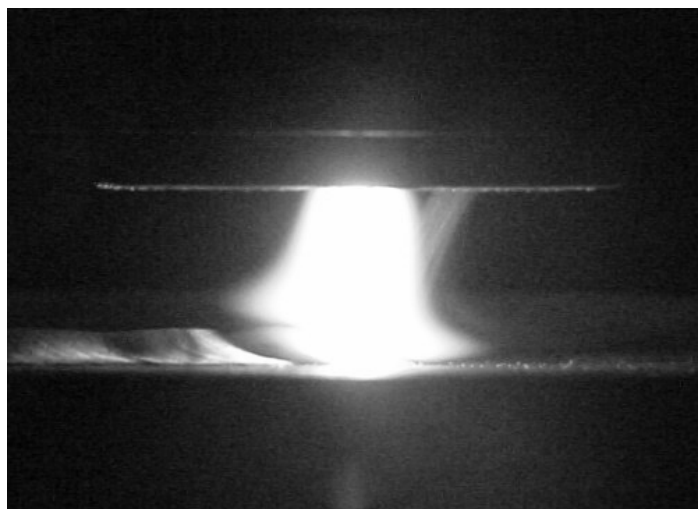


Figura 4.35 – Registro fotográfico que mostra o efeito do gás de arraste sobre o arco plasma utilizando um único condúite de alimentação de pó

As Figuras 4.36 e 4.37 mostram o aspecto superficial e seção transversal dos cordões realizados com um bico constritor de 60°, devido a que este bico constritor é similar ao descrito por Mekideche (1989), no qual o pó entra diretamente na poça fundida.

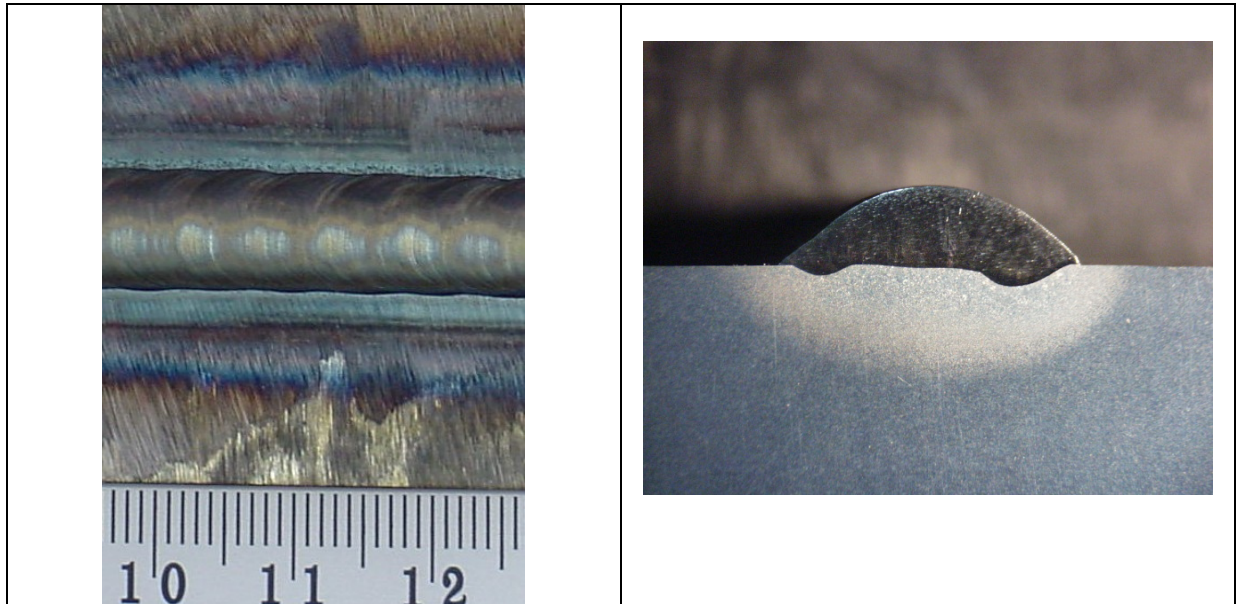


Figura 4.36 – Aspecto superficial. $I = 120$ A, $V_s = 8$ cm/min, $T_x = 0,5$ kg/h
 $\delta = 11,5$ %

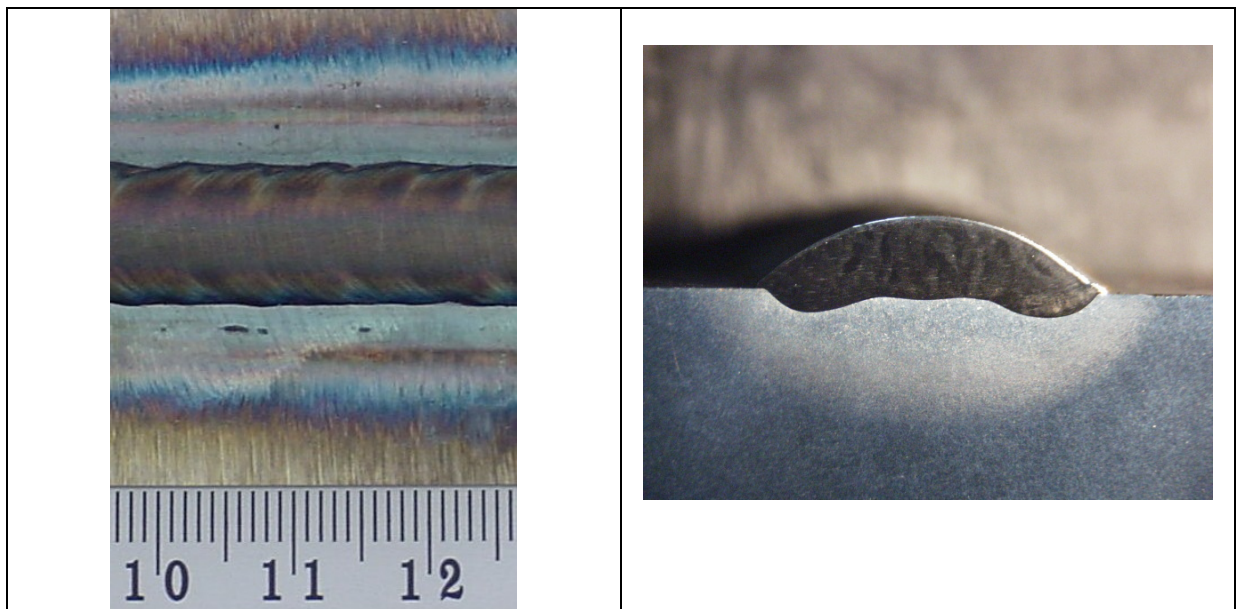


Figura 4.37 – Aspecto superficial. $I = 130$ A, $V_s = 8$ cm/min, $T_x = 0,5$ kg/h
 $\delta = 22$ %

4.2.2 Determinação do rendimento de deposição e influência do ângulo de convergência do bico constritor

4.2.2.1 Introdução

O estudo tem como objetivo a determinação da quantidade de material efetivamente inserida na solda em relação à quantidade de material alimentado. As perdas ocorrem principalmente devido à vaporização e também à dispersão das partículas depois do choque com o substrato (Lin, 1999). A Figura 4.38 mostra a dispersão de partículas no momento da realização de um depósito.



Figura 4.38 – Fotografia que mostra a dispersão de partículas

Como já foi mencionado anteriormente, a tocha possui um bico constritor, o qual permite a entrada de pó em forma convergente no arco plasma através de dois orifícios injetores. Neste estudo o ângulo de convergência também será avaliado para identificar sua influência sobre o rendimento de deposição. A vazão do gás de arraste influencia na dispersão das partículas. Em muitos casos é possível, ao final da operação do revestimento, observar partículas de pó não fundidas aderidas nas laterais do revestimento. Por outro lado, em ocasiões em que a taxa de deposição é muito alta (1,5 kg/h) em relação à corrente de soldagem (160 A) observa-se pó sem fundir espalhado sobre o substrato.

4.2.2.2 Procedimento experimental

Foi utilizado como material de aporte a liga Stellite 6, em forma de pó. As variáveis e parâmetros de soldagem utilizados para a determinação do rendimento de deposição são apresentados na Tabela 4.4. Realizaram-se testes sobre chapas de aço carbono da classe ABNT 1020. Foram utilizadas três chapas: “início”, “regime” e “fim” e montadas como mostra o esquema da Figura 4.39. As chapas denominadas de “regime” foram cortadas nas dimensões de 12,5x60x100 mm e esmerilhadas para remoção da camada de óxido e em seguida pesadas. As chapas denominadas de “início” e “fim” foram cortadas nas dimensões de 12,5x60x60 mm e esmerilhadas para remoção da camada de óxido.

Foram realizados 12 ensaios considerando três níveis de corrente, duas taxas de deposição e dois tipos de bicos constritores. Para a determinação da influência do ângulo de convergência do bico constritor a avaliação foi realizada através do aspecto superficial e do rendimento de deposição. O rendimento de deposição foi realizado pesando o corpo de prova denominado de “regime” antes (m_1) e depois (m_2) da operação de deposição.

Tabela 4.4 – Variáveis e parâmetros de soldagem-Rendimento de deposição

Variáveis		
Corrente de soldagem	I(A)	160,170,180
Velocidade de soldagem	Vs(cm/min)	20
Gás de plasma	VGP(l/min)	2,4
Gás de proteção	GPr(l/min)	10
Gás de arraste	GTr(l/min)	2
Taxa de alimentação	Tx(kg/h)	1,17; 1,53
Diâmetro do bico constritor/ângulo de convergência	d(mm)/(°)	4,8/30 e 60°
Distância bico-peça	DBP(mm)	10
Recuo	Rc(mm)	2,4

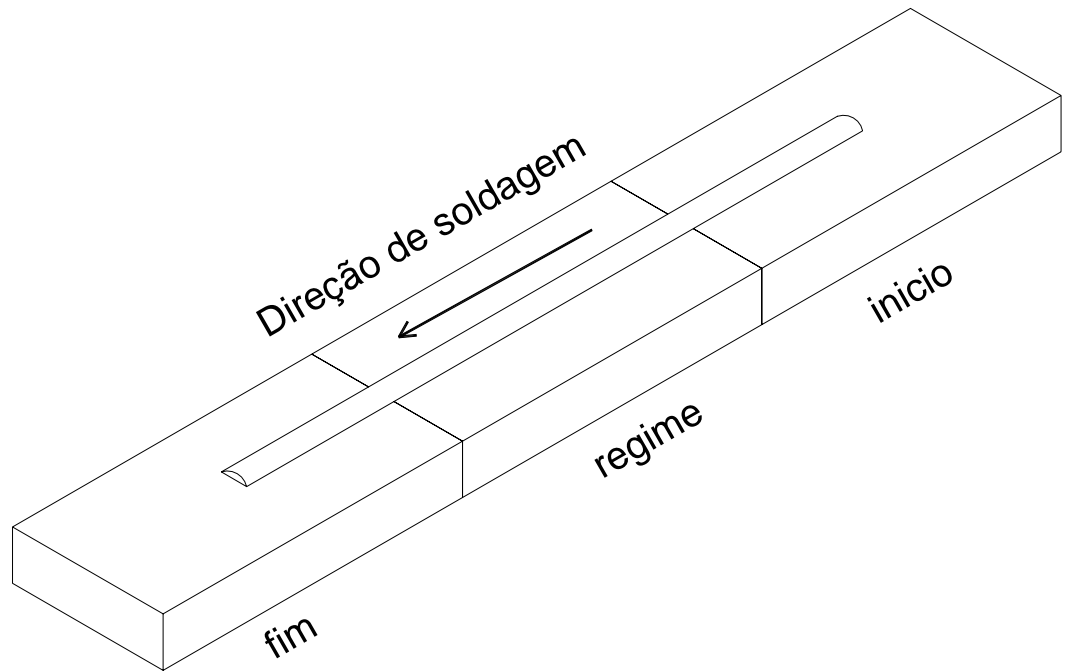


Figura 4.39 – Montagem dos corpos de prova início, regime e fim

O rendimento de deposição pode ser determinado mediante a seguinte expressão:

$$\eta_{Tx} = ((m_2 - m_1) / m_{ADP}) * 100 \quad (\%) \quad (7.0)$$

Onde:

η_{Tx} : Rendimento de deposição

m_2 : Massa da chapa depois do depósito

m_1 : Massa da chapa antes do depósito

m_{ADP} : Massa de material de aporte fornecido pelo ADP

4.2.2.3 Análises dos resultados

4.2.2.3.1 Determinação do rendimento de deposição

A Figura 4.40, mostra a montagem do corpo de prova. Observe-se que na montagem foram utilizadas três chapas: “início”, “regime” e “fim”.

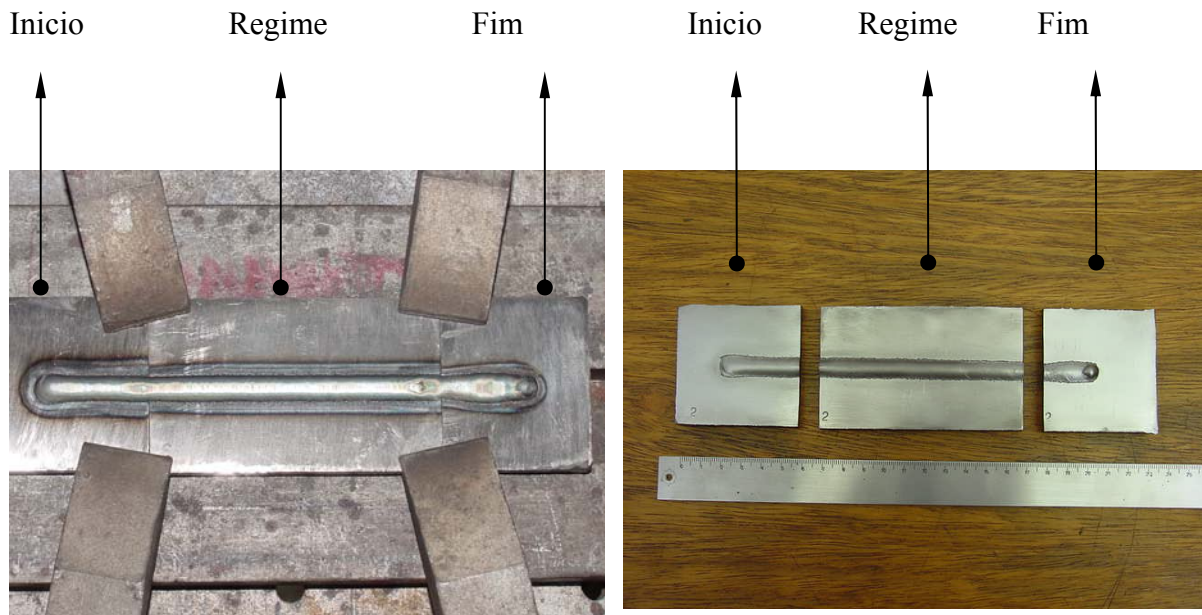


Figura (a)

Figura (b)

Figura 4.40 – (a) Montagem dos corpos de prova, (b) Corpo de prova “regime” desmontado pronto para ser pesado

As Tabelas 4.5 e 4.6 apresentam os resultados dos ensaios. Foram realizados 6 ensaios, para cada tipo de bico constritor, considerando três níveis de corrente e dois níveis de taxa de alimentação. O corpo de prova denominado de “regime” foi pesado antes (m_1) e depois (m_2) da operação de deposição.

Tabela 4.5 – Rendimento de deposição para diferentes níveis de corrente e taxa de alimentação. Bico constritor de 30°.

Valores ajustados						
Bico-30	Tx(kg/h)			Tx(kg/h)		
	1,17			1,5		
	Corrente (A)			Corrente (A)		
	160	170	180	160	170	180
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
Valores medidos						
m1(g)	584	583,6	589,4	584,8	586,9	586,3
m2(g)	592,8	592	598,2	595,5	596,8	597,5
Lr(mm)	99,6	99	100	100	99,1	99,7
t(h)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Txd(g/min)	17,7	17	17,6	21,4	20	22,5
Txd(kg/h)	1,06	1,01	1,05	1,28	1,19	1,34
η_{Tx} (%)	90,6	87,0	90,2	85,5	79,8	89,8
I(A)	160,9	170,1	181,3	161,2	170,1	182,7
U(V)	19,2	19,3	19,9	18,8	19	19,8

m1: Massa da chapa sem deposição; m2: Massa da chapa com deposição
 Lr: Comprimento da chapa “regime”; t: Tempo para produzir o depósito na chapa “regime”
 Td: Taxa de deposição; η_{Tx} : Rendimento; I: Corrente ; U: Tensão; CP: Corpo de prova

Tabela 4.6 – Rendimento de deposição para diferentes níveis de corrente e taxa de alimentação. Bico constritor de 60°.

Valores Ajustados						
bico-60	Tx(kg/h)			Tx(kg/h)		
	1,17			1,53		
	Corrente (A)			Corrente (A)		
	160	170	180	160	170	180
	CP7	CP8	CP9	CP10	CP11	CP12
Valores medidos						
m1(g)	585,1	593,6	577,9	585,1	598,7	628,6
m2(g)	594,6	602,8	587,4	597,2	610,7	640,9
Lr(mm)	97,8	100	98	98	96,9	98,4
t(min)	0,49	0,50	0,50	0,49	0,48	0,49
Txd(g/min)	19,4	18,4	19,4	24,7	24,8	25
Txd(kg/h)	1,16	1,10	1,16	1,48	1,48	1,5
η_{Tx} (%)	99,5	94,2	99,4	96,8	97,1	98,0
I(A)	155,4	167,2	176,5	156,2	166,2	176,2
U(V)	19,2	20	20,2	19,8	20,2	20,6

m1: Massa da chapa sem deposição; m2: Massa da chapa com deposição

Lr: Comprimento da chapa “regime”; t: Tempo para produzir o depósito na chapa “regime”

Td: Taxa de deposição; η_{Tx} : Rendimento; I: Corrente ; U: Tensão; CP: Corpo de prova

A Figura 4.41, apresenta graficamente o rendimento de deposição do processo para os diferentes níveis de corrente, taxa de alimentação e tipo de bico constritor. O processo apresenta uma eficiência de deposição na ordem do 87%, para o bico constritor de 30° e 97% para o bico constritor de 60°, sendo que os maiores rendimentos foram obtidos com elevadas correntes (180 A), independente da taxa de deposição. Resultados similares são apresentado por Davis (1993), mostrando uma faixa de 85 a 95 % como rendimento de deposição para o processo PTAP.

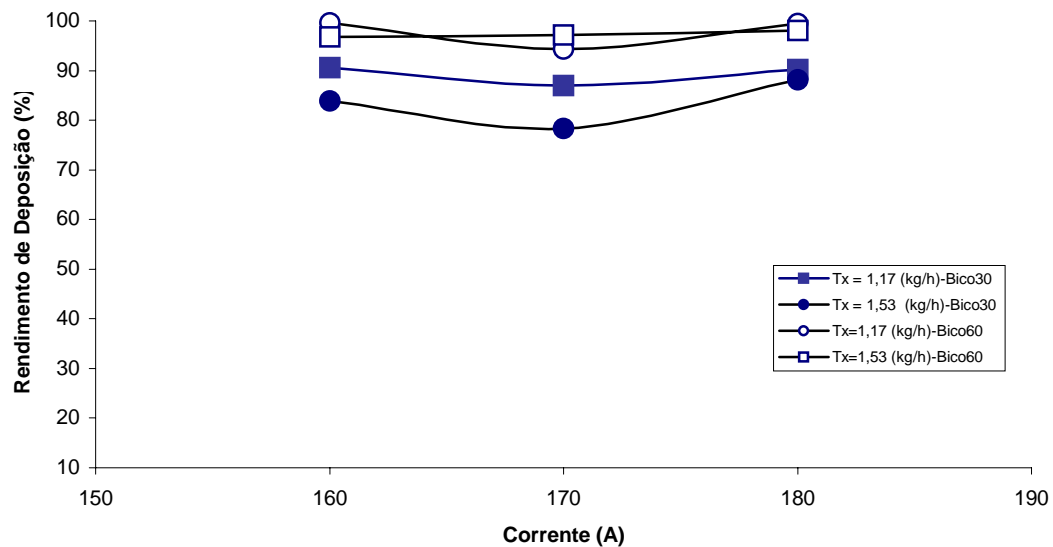


Figura 4.41 – Rendimento de deposição

4.2.2.3.2 Influência do ângulo de convergência do bico constritor.

No processo Plasma a constrição do arco é produzida no bico constritor, e varia com o valor do recuo do eletrodo e o diâmetro do orifício constritor. Observe-se que no processo PTAP, diferentemente do processo convencional PTAA, o bico constritor, além de produzir a constrição do arco, deve permitir a entrada do fluxo de pó em forma convergente na coluna do arco plasma. Assim, o ângulo de convergência pode variar entre cada bico constritor a ser utilizado. Por exemplo, nesta pesquisa foram projetados dois tipos de bicos constritores, denominados de bico-30 e bico-60, com o objetivo de avaliar a influência deste ângulo de convergência sobre a qualidade dos revestimentos.

Lin, em 1999, verificou a influência do ângulo de convergência dos bicos usados no processo de deposição por laser. O trabalho de Lin, foi o referencial para estudar, no LABSOLDA, o efeito do ângulo de convergência do bico constritor utilizado no processo PTAP.

A Figura 4.42 mostra o corte transversal dos bicos constritores. O bico constritor de 30°, permite a entrada de pó no arco plasma bem próximo da face externa do bico constritor, ou seja, a uma distância de 3,2 mm. Por outro lado, o bico constritor de 60° permite a entrada de pó diretamente na poça fundida, quando é utilizada uma distância bico-peça de 10 mm. O critério principal na avaliação do ângulo de convergência do bico constritor é a qualidade do depósito.

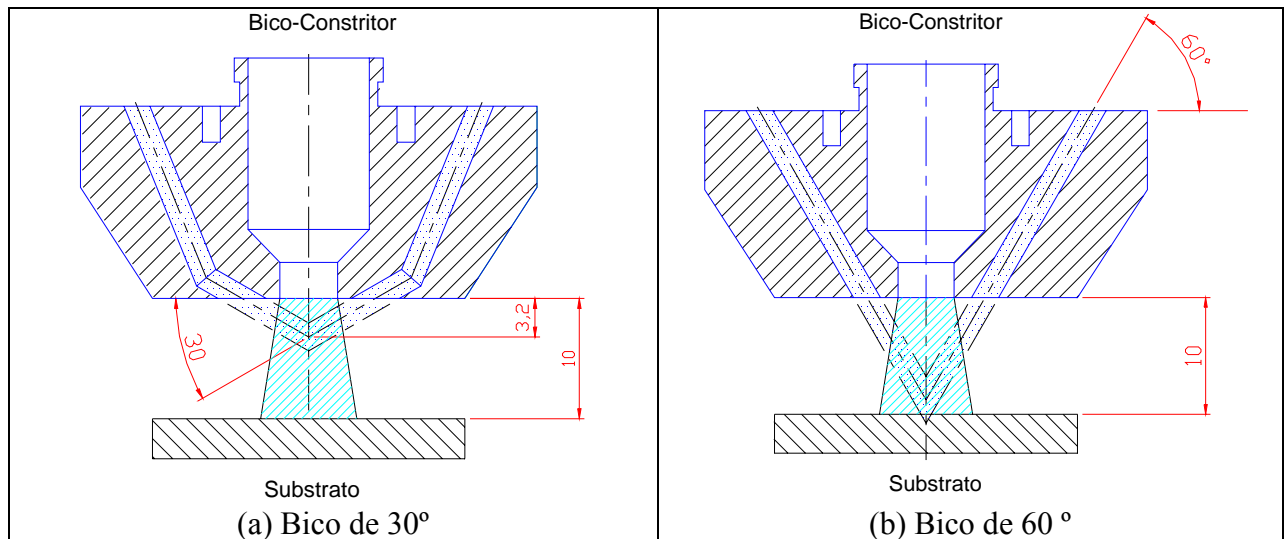
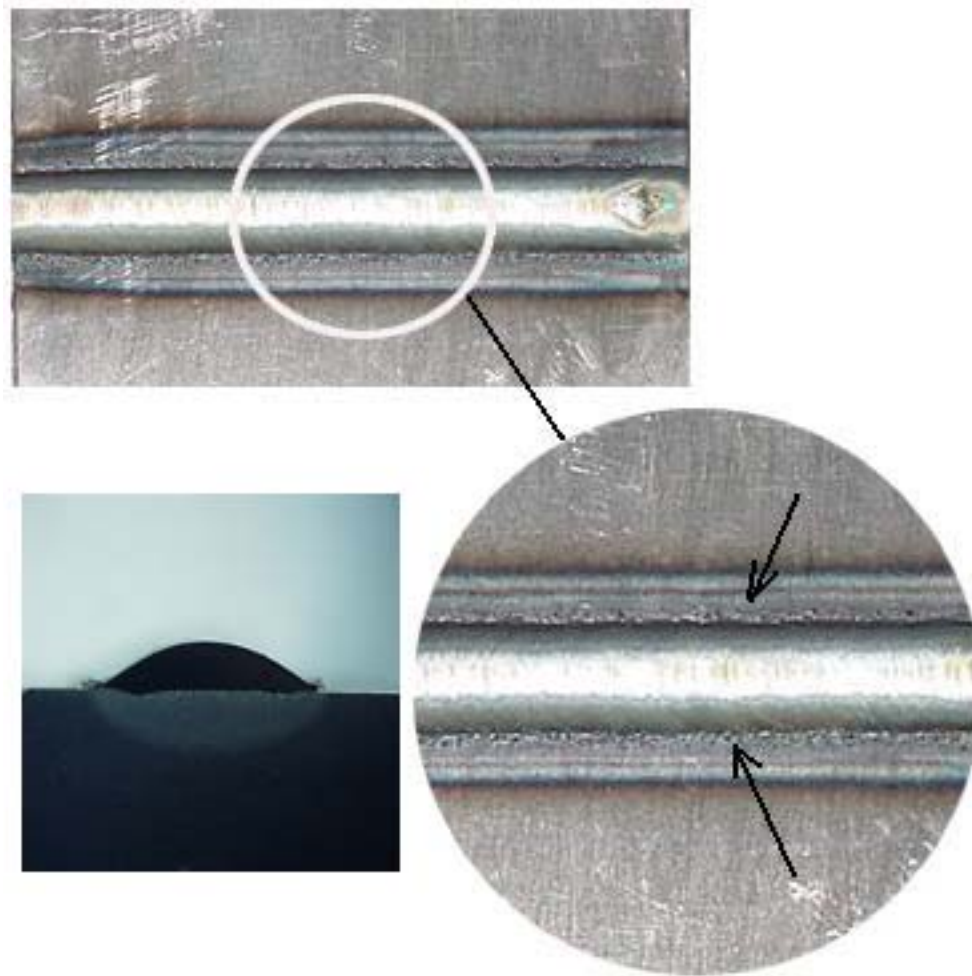


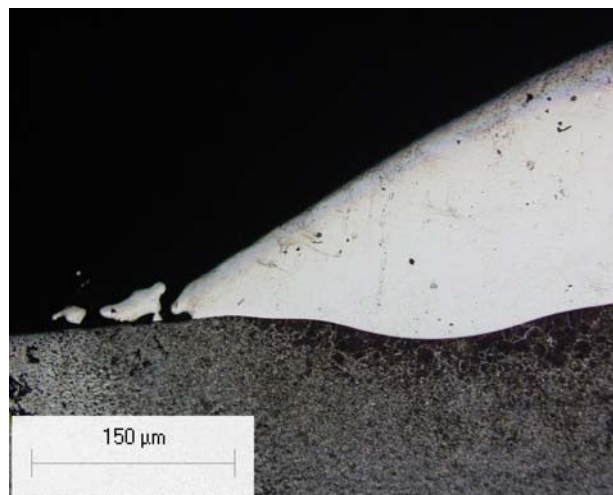
Figura 4.42 – Corte transversal dos bicos constritores mostrando a entrada do fluxo de pó no arco plasma.

Verificou-se, por observação visual, a existência de pó não fundido nas regiões laterais dos depósitos quando foi empregado o bico constritor de 30°. Na operação de extração dos corpos de prova, para a realização da análise metalográfica, verificou-se a presença de falta de fusão nas laterais do cordão. As Figuras 4.43a e 4.43b mostram o aspecto visual dos cordões e seção transversal. Nos ensaios realizados com o bico de 60° não foi observado este efeito (Figura 4.44). Ao analisar a origem do efeito do pó sem fundir nas laterais dos depósitos tem-se que:

- a) O formato do arco plasma depende fortemente do tipo de gás de arraste (Belkacem, 2001), vazão do gás de arraste (Vergara *et al*, 2004) e ângulo de convergência-item **4.3. Análise da influência da vazão do gás de arraste sobre o arco plasma**. Quando é utilizado o bico constritor de 30° o pó é injetado no arco plasma a uma distância fixa de 3,2 mm, medidos em relação à face externa do bico constritor, segundo mostra a Figura 4.42a. Neste caso específico, o gás de arraste modifica a geometria característica do arco plasma, o que inicialmente é um arco aproximadamente cilíndrico, é transformado em um cone truncado. As setas da Figura 4.43a indicam a região onde o pó não foi totalmente fundido e a Figura 4.43b mostra a falta de fusão. Com o intuito de eliminar a falta de fusão nas laterais, procedeu-se a realizar ensaios com menores velocidades de soldagem. A Figura 4.45 mostra um revestimento realizado com uma velocidade de 12 cm/min, por inspeção visual é possível verificar que não existe pó sem fundir nas laterais do revestimento e a falta de fusão foi menor.

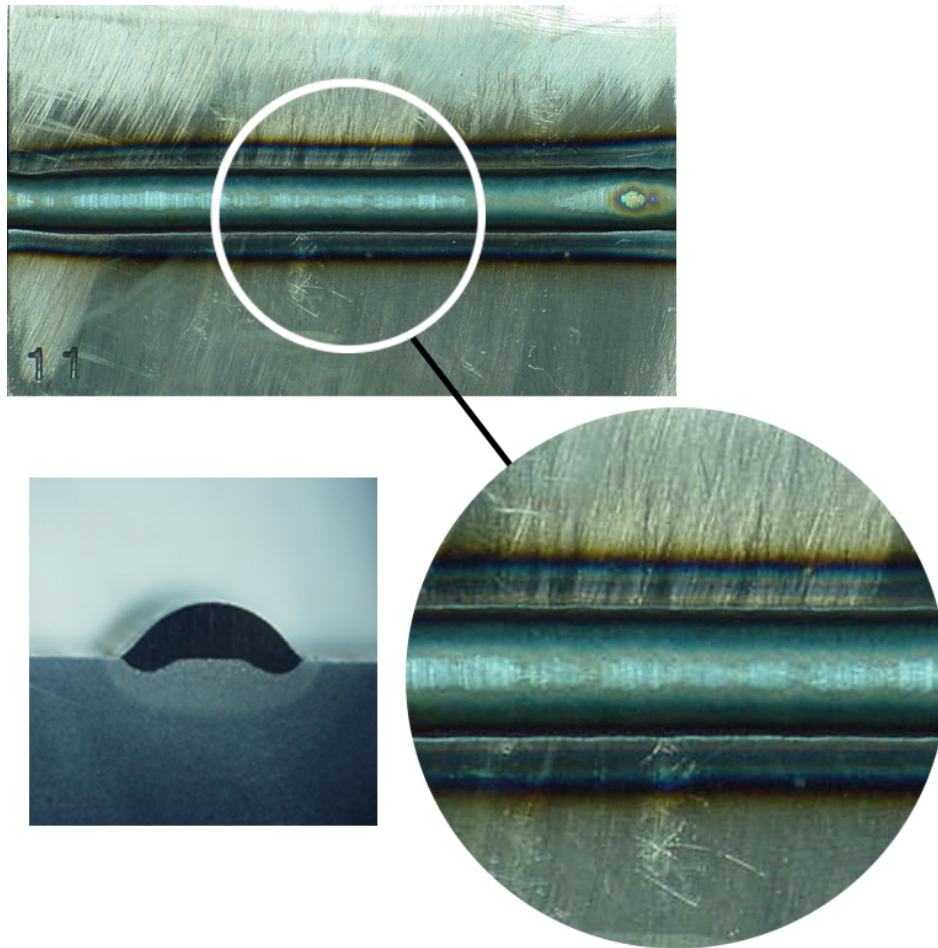


a – Aspecto do cordão

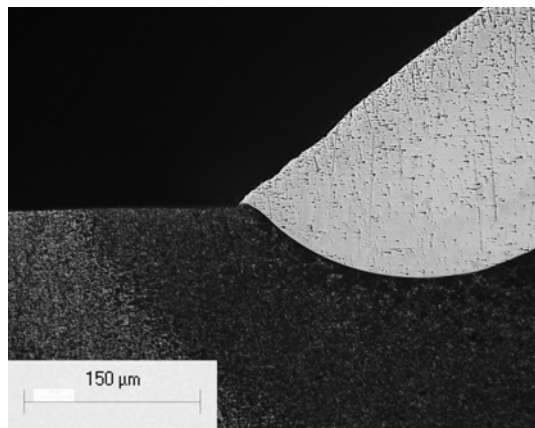


b – Falta de fusão na região lateral do cordão

Figura 4.43 – Aspecto do cordão para um bico constritor de 30°. $V_s = 20$ cm/min

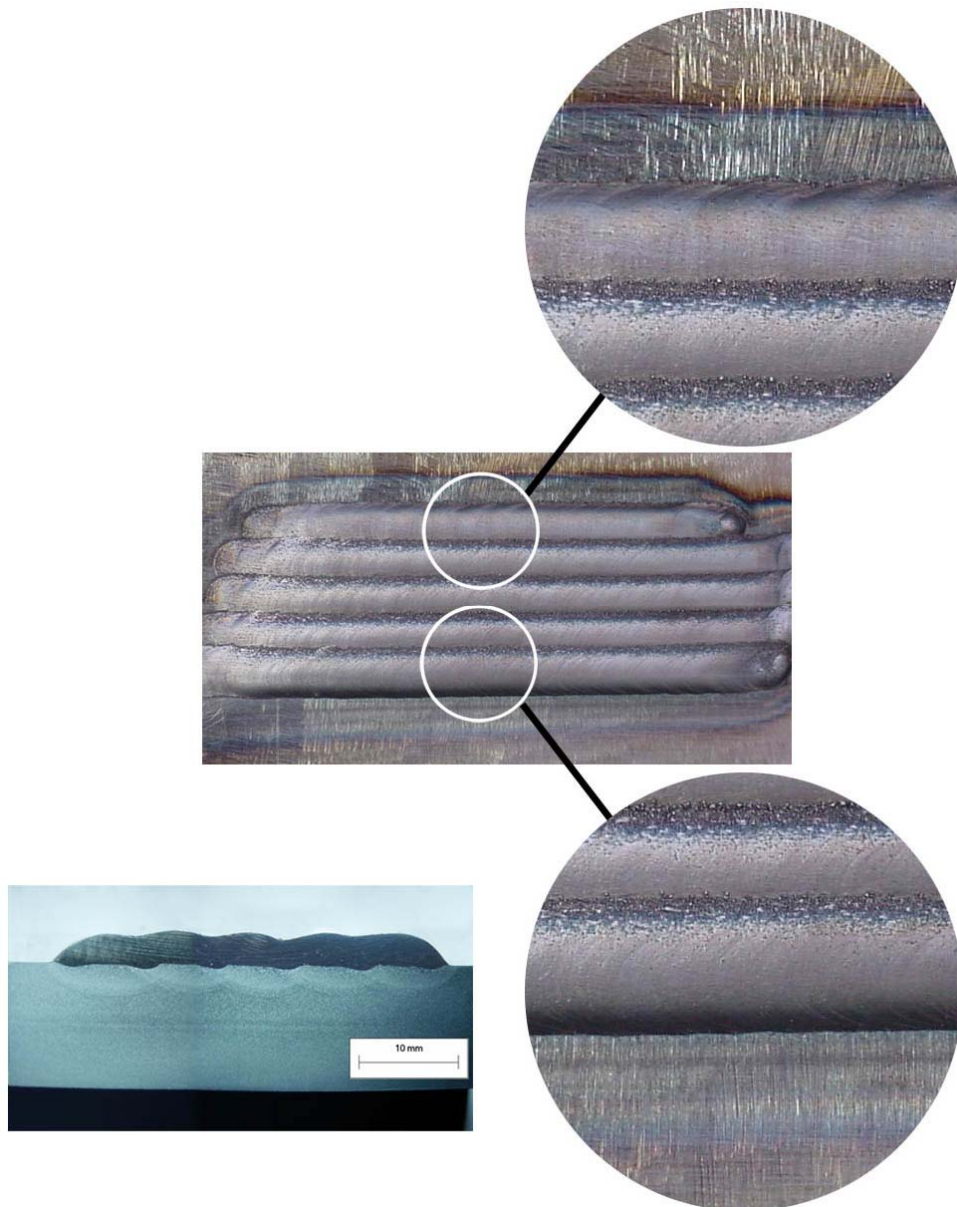


a – Aspecto do cordão

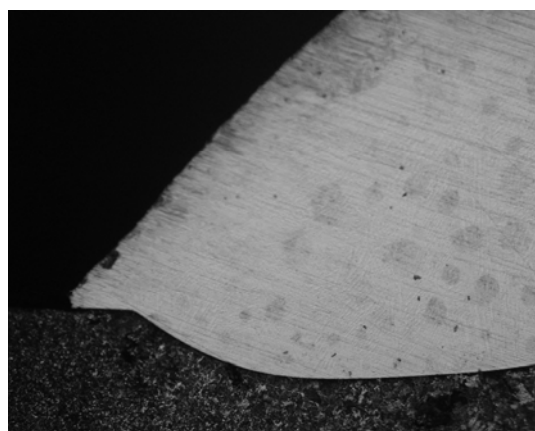


b – Fusão completa na região lateral do cordão

Figura 4.44 – Aspecto do cordão para um bico constritor de 60°. $V_s = 20$ cm/min



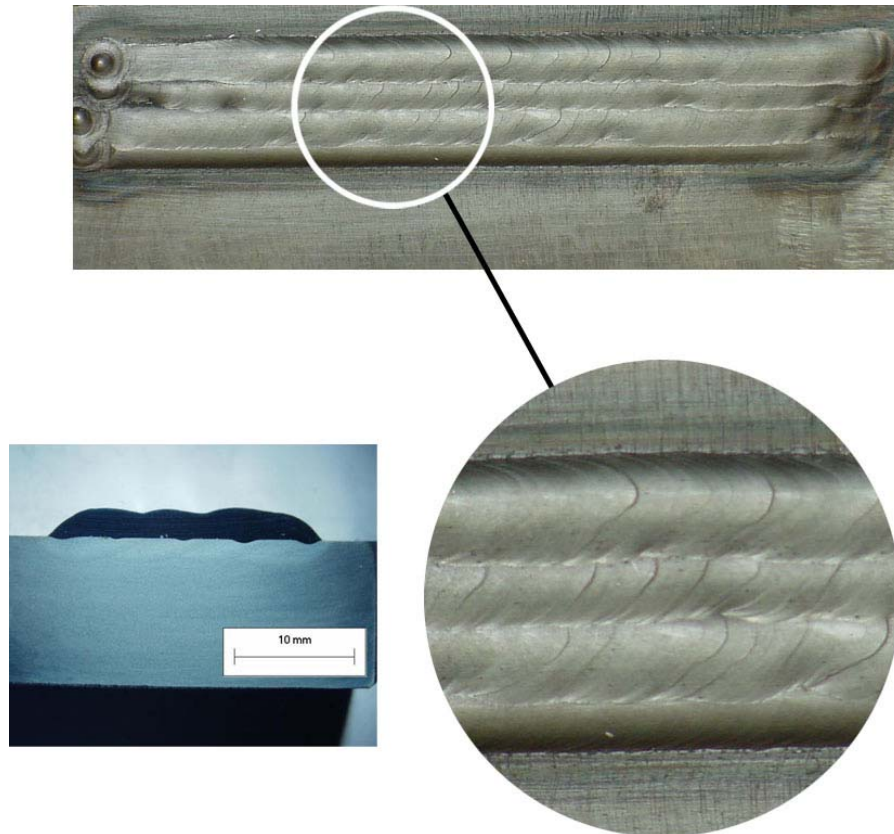
a – Aspecto do revestimento



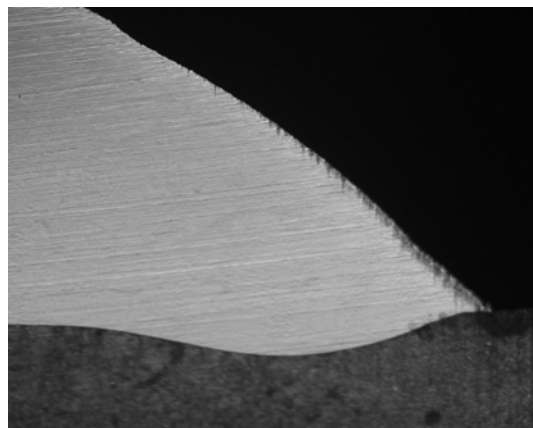
b – Falta de fusão na região lateral do revestimento

Figura 4.45 – Aspecto do revestimento para um bico constritor de 30°. Vs = 12 cm/min

- b) Considerando o bico constritor de 60° , o pó é injetado diretamente na poça fundida, segundo mostra a Figura 4.42b. A maior penetração nas laterais do cordão poderia ser explicada pelo deslocamento da poça fundida produzido pelo jato de gás de arraste. Assim, nesses locais a transferência de calor do arco para o substrato seria mais eficaz (Figura 4.44a). Por outro lado, a Figura 4.44b mostra o detalhe da região lateral. A Figura 4.46 mostra o aspecto de um revestimento produzido com este tipo de bico constritor.



a – Aspecto do revestimento



c) Fusão completa na região lateral do revestimento

Figura 4.46 – Aspecto do revestimento obtido com um bico constritor de 60° . $V_s = 20$ cm/min

4.2.3 Análise da influência do recuo do eletrodo e da distância bico-peça (DBP).

4.2.3.1 Introdução

No processo de soldagem plasma convencional, o recuo do eletrodo tem grande influência sobre o grau de constrição do arco e a rigidez do arco plasma, influenciando, portanto, na penetração do cordão de solda. Com o objetivo de conhecer o comportamento deste fator sobre o processo PTAP, foram conduzidos alguns experimentos para dois valores de recuo: 0,8 e 2,4 mm.

A distância bico-peça é apresentada como uma variável que tem uma influência significativa sobre a qualidade dos revestimentos. Deuis *et al* (1991) verificaram que para poder obter uma boa eficiência na deposição, a distância bico peça está limitada a um valor entre 10 a 15 mm. Para valores acima desta faixa a eficiência do gás de proteção é reduzida significativamente. Por outro lado, nesta pesquisa, foi observado que valores superiores desta faixa de DBP é comprometida a abertura do arco principal. Conforme Hallén *et al* (1991), no processo de soldagem plasma de arco transferido alimentado com pó, foi observado que variações na distância bico peça apresentam um efeito significativo sobre o grau de diluição dos depósitos.

Com o objetivo de conhecer ainda mais esta característica do processo e confrontar a literatura, foram conduzidos alguns experimentos variando a DBP em dois níveis, 6 e 10 mm e para três níveis de corrente 160, 170 e 180 A, o que resultou em 6 condições de ensaio.

4.2.3.2 Procedimento experimental

Foi utilizado como material de aporte a liga Stellite 6, em forma de pó. As variáveis e parâmetros de soldagem utilizados para a determinação da influência do recuo do eletrodo e da distância bico-peça são apresentadas na Tabela 4.7. A avaliação foi feita através das medições de diluição. Realizaram-se testes sobre chapas de aço carbono da classe ABNT 1020. Essas foram cortadas nas dimensões de 12,5x60x155mm e esmerilhadas para a remoção da camada de óxido. Dois valores de recuo do eletrodo foram testados (0,8 e 2,4 mm) para uma corrente de 170 A com uma taxa de deposição de 1,17 kg/h. A avaliação foi feita através do aspecto superficial.

Tabela 4.7 – Variáveis e parâmetros de soldagem-Recuo e Distância bico peça

Variáveis		
Corrente de soldagem	I(A)	160, 170, 180
Velocidade de soldagem	Vs(cm/min)	20
Gás de plasma	VGP(l/min)	2,4
Gás de proteção	GPr(l/min)	10
Gás de arraste	GTr(l/min)	2
Taxa de alimentação	Tx(kg/h)	1,17
Diâmetro do bico constritor/ângulo de convergência	d(mm)/(°)	4,8/30-60
Distância bico-peça	DBP(mm)	6; 10
Recuo	Rc(mm)	0,8; 2,4

4.2.3.3 Análises dos resultados

4.2.3.3.1 Recuo do eletrodo

A Figura 4.47 mostra a seção transversal dos depósitos realizados com um bico constritor de 30°. Os resultados demonstraram que o acabamento do cordão foi melhor para um recuo de 2,4 mm.

As soldagens realizadas com um bico constritor de 60°, apresentaram um bom acabamento superficial para os dois valores de recuo (veja a Figura 4.48).

O bico constritor de 60°, apresentou melhores resultados para os dois valores de recuo testados em comparação ao bico constritor de 30°.



a) recuo = 0,8 mm; U=18,4 V; L=9,5 mm; p=0,22 mm



b) recuo = 2,4 mm; $U=19,3$ V; $L=9,31$ mm; $p=0,16$ mm

Figura 4.47 – Efeito do recuo do eletrodo sobre o aspecto geométrico dos depósitos com PTAP usando $I = 170$ A, $V_s = 20$ cm/min e $T_x = 1,17$ kg/h. Bico constritor de 30° .



a) recuo = 0,8 mm; $U=18,2$ V; $L=8,46$ mm; $p=0,38$ mm



b) recuo = 2,4 mm; $U=20$ V; $L=9,0$ mm; $p=0,45$ mm

Figura 4.48 – Efeito do recuo do eletrodo sobre o aspecto geométrico dos depósitos com PTAP usando $I = 170$ A, $V_s = 20$ cm/min e $T_x = 1,17$ kg/h. Bico constritor de 60° .

Foi observado que, para todos os depósitos realizados com um recuo de 0,8 mm ao final da operação de soldagem, ficou pó sem fundir espalhado no substrato, o que explica a menor área transversal dos depósitos.

4.2.3.3.2 Distância bico-peça (DBP)

As Figuras 4.49 e 4.50 mostram a seção transversal dos cordões.

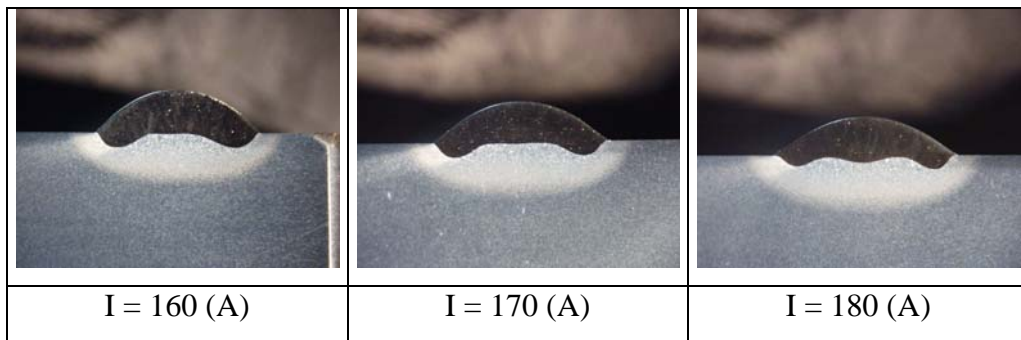
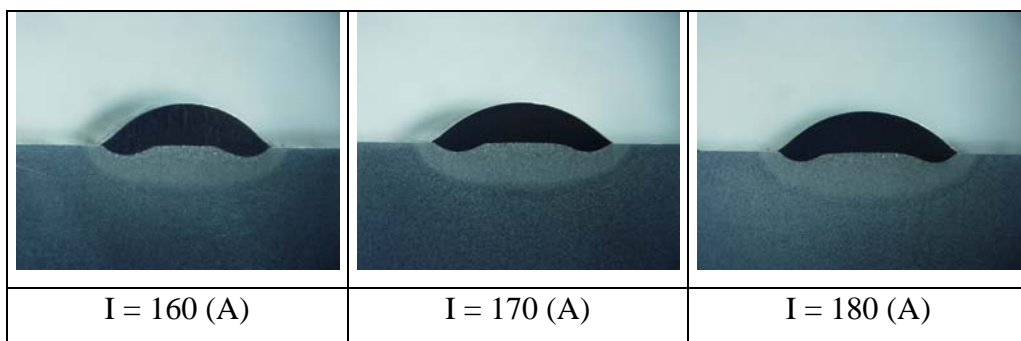


Figura 4.49 – Seção transversal dos cordões para uma DBP= 6 mm



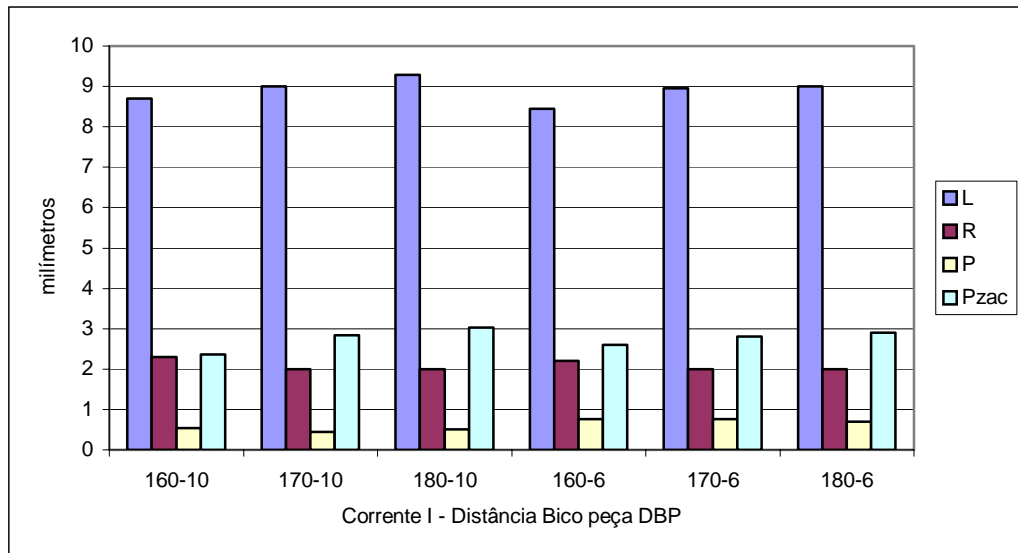
$V_s = 20 \text{ cm/min}$ e $T_x = 1,17 \text{ kg/h}$

Figura 4.50 – Seção transversal dos cordões para uma DBP=10 mm

A Figura 4.51 indica o efeito na largura, reforço, penetração e profundidade da ZAC, para dois níveis de distância bico-peça e para três níveis de corrente. A largura do depósito é influenciada com o aumento da distância bico-peça, devido que à medida que aumenta a distância bico-peça, resulta nas perdas das características do arco plasma, tornando-se cônico. Neste caso o depósito apresenta uma largura maior (veja as Figuras 4.49 e 4.50)

Por outro lado, a distância bico-peça afeta significativamente na penetração. Os maiores valores de penetração são conseguidos para valores de distância bico-peça menores.

Outro fato importante a ser considerado é a variação da tensão do arco em função da variação da distância bico-peça, Figura 4.52.



L: Largura; R: Reforço; P: Penetração; Pzac: Profundidade da ZAC

Figura 4.51 – Condições geométricas dos depósitos em função da distância bico-peça (DBP)

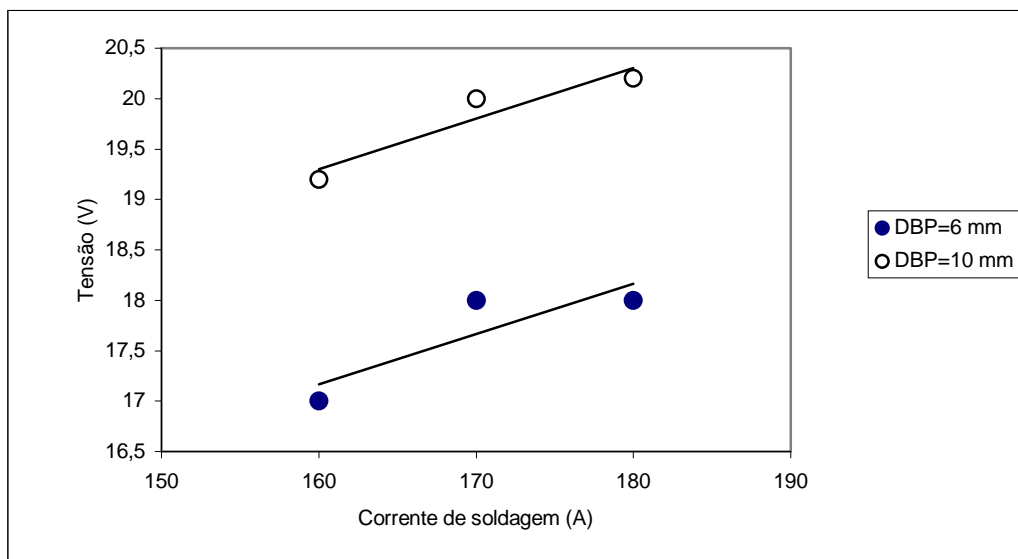


Figura 4.52 – Efeito do fator distância bico-peça na tensão do arco

Observe-se na Figura 4.53 que os maiores valores de diluição correspondem a uma DBP menor, ou seja, de 6 mm, devido aos maiores valores de penetração obtidos para este valor de recuo. Resultados similares são achados na bibliografia especializada. O estudo realizado por Hallén *et al* (1991), teve como objetivo principal, determinar que variáveis apresentam uma influência significativa sobre o grau de diluição. Observaram que a DBP apresenta uma grande influência na diluição e determinaram em fixá-la em 20 mm para todos os

experimentos. Esse valor de DBP de 20 mm parece alto, mas há que considerar que as taxas de deposição utilizadas e níveis de corrente são muito superiores aos utilizados neste estudo.

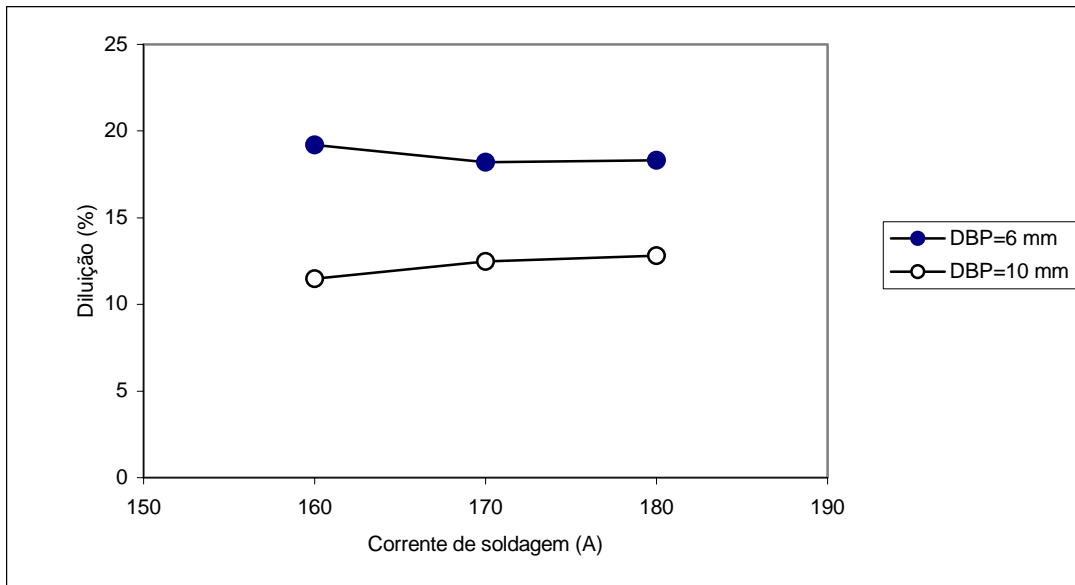


Figura 4.53 – Efeito da distância bico-peça (DBP) sobre o grau de diluição

A Figura 4.54 mostra a seção transversal dos cordões depositados com um bico constritor de 30°, utilizando-se uma distância bico-peça de 6 mm. Foi observado ao final da operação de soldagem pó sem fundir espalhado sobre o substrato o que justificaria as mudanças nas áreas da seção transversal dos depósitos. Devido a esta característica não é recomendável realizar depósitos com o bico constritor de 30° para uma distância bico peça de 6 mm.

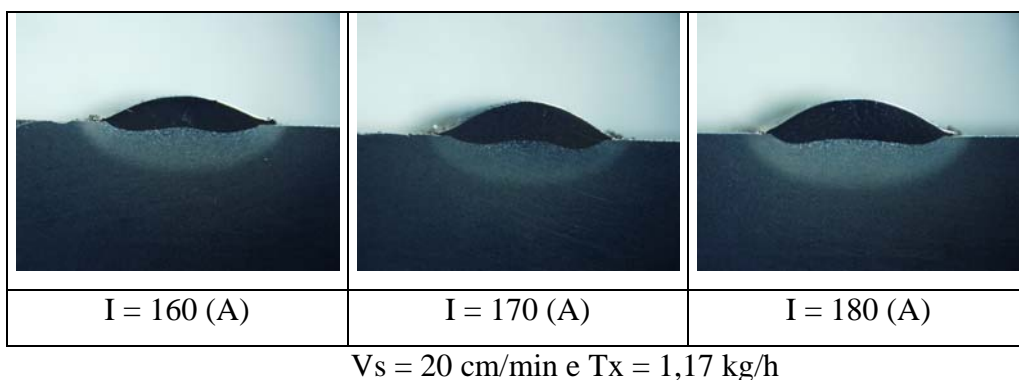


Figura 4.54 – Seção transversal dos cordões para uma DBP= 6 mm. Bico constritor de 30°

4.2.4 Análise da influência da vazão de gás de plasma

4.2.4.1 Introdução

Em virtude do Processo de Soldagem PTAP ter similaridades com o Processo PTAA, foram realizados, ao longo da pesquisa, uma serie de comparações entre ambos. A primeira tentativa foi verificar o efeito da vazão de gás de plasma sobre o grau de diluição dos depósitos. Foram conduzidos ensaios com o processo PTAA para conferir o efeito da vazão de gás de plasma sobre o grau de diluição e em seguida foram comparados estes resultados com os do processo PTAP.

4.2.4.2 Procedimento experimental

Foram conduzidos ensaios com o Processo Plasma de Arco Transferido Alimentado com Arame para conferir o efeito da vazão de gás de plasma sobre o grau de diluição e em seguida foram comparados estes resultados com o Processo Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó. A influência da vazão de gás de plasma foi avaliada a partir dos valores de diluição, dimensões do cordão (L, R, P), profundidade da ZAC, dureza e microestrutura, medidos em depósitos realizados com os parâmetros indicados na Tabela 4.8. Foram empregados três níveis de vazão de gás de plasma: 2,2; 2,4 e 3,0 (l/min). Realizaram-se testes sobre chapas de aço carbono da classe ABNT 1020. Essas foram cortadas nas dimensões de 12,5x60x155mm e esmerilhadas para a remoção da camada de óxido.

Tabela 4.8 – Variáveis e parâmetros de soldagem-Gás de plasma

Variáveis do Processo PTAP		
Corrente de soldagem	I(A)	160
Velocidade de soldagem	Vs(cm/min)	20
Gás de plasma	VGP(l/min)	2,2; 2,4; 3,0
Gás de proteção	GPr(l/min)	10
Gás de arraste	GTr(l/min)	2
Taxa de alimentação	Tx(kg/h)	1,4
Diâmetro do bico constritor/ângulo de convergência	d(mm)/(°)	4,8/30
Distância bico-peça	DBP(mm)	10
Recuo	Rc(mm)	2,4
Variáveis do Processo PTAA		
Diâmetro do arame (tubular)	mm	1,2
Velocidade de arame	Va(m/min)	3,0
Taxa de deposição	Tx(kg/h)	1,4
Diâmetro do bico constritor	d(mm)	3,2

4.2.4.3 Análises dos resultados

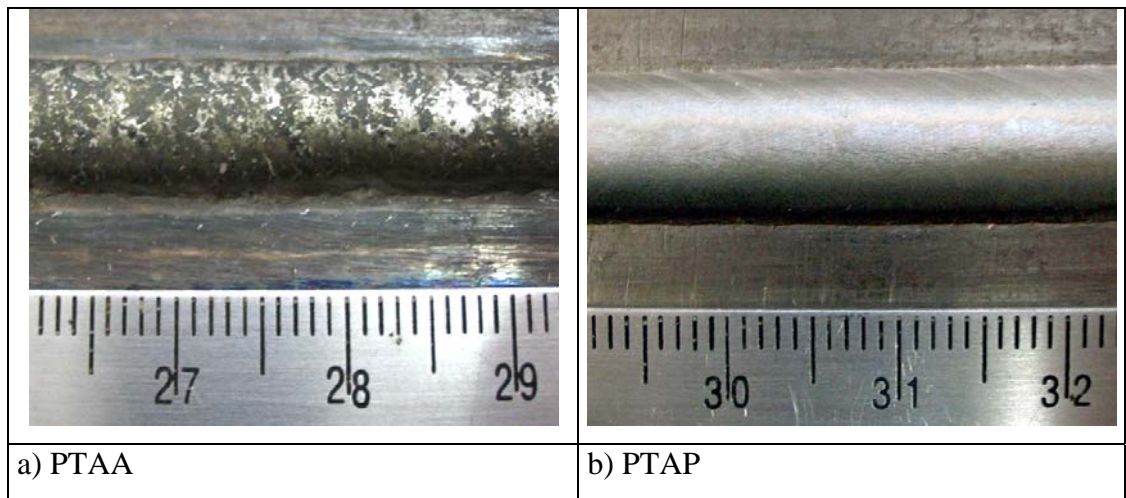
A Figura 4.55 mostra o aspecto externo dos cordões. O processo PTAP foi o que produziu o melhor acabamento superficial, menor diluição, melhor molhamento e maior largura.

As Figuras 4.56 e 4.57 mostram a seção transversal dos cordões obtidos pelos dois processos (PTAA e PTAP) e a Tabela 4.9 apresenta os resultados das condições geométricas dos cordões, para três níveis de vazão de gás de plasma: 2,2; 2,4 e 3,0 l/min.

O gráfico da Figura 4.58 mostra o efeito da vazão de gás de plasma sobre o grau de diluição, utilizando-se o arame Stellite 6, diâmetro 1,2 mm tubular. Os resultados indicam que a diluição aumenta com a vazão de gás de plasma devido, talvez, à maior pressão do jato de plasma. Resultados semelhantes foram encontrados quando se trata do processo PTAP,

encontrando-se valores de diluição menores aos conseguidos no processo PTAA quando são empregadas as mesmas condições de soldagem. Resultados semelhantes foram obtidos por Silvério *et al* (2003), envolvendo a liga Stellite 1.

Quando comparados os depósitos realizados através dos dois processos, pode-se observar que o reforço, penetração e profundidade da ZAC são sempre menores no processo PTAP (Figura 4.59).



$I = 160 \text{ A}$, $V_s = 20 \text{ cm/min}$, $T_x = 1,4 \text{ kg/h}$, Gás de plasma = $2,4 \text{ l/min}$

Figura 4.55 – Aspecto superficial dos depósitos de Stellite 6 depositados por: a) PTAA
b) PTAP

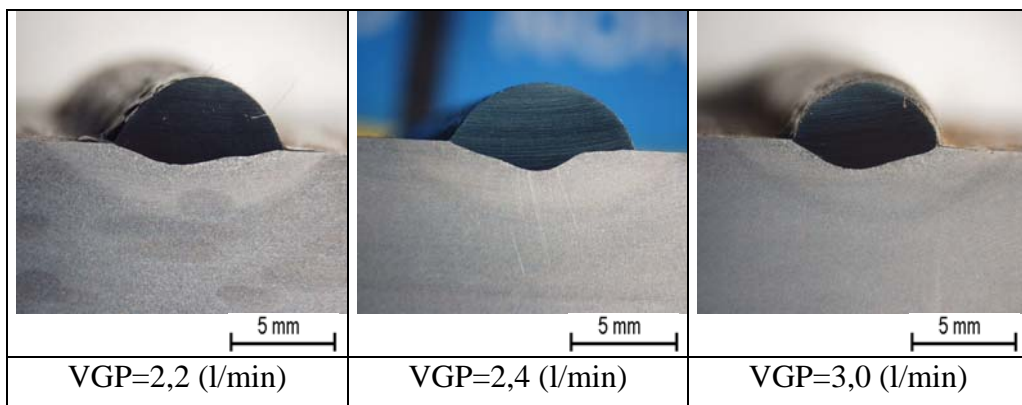


Figura 4.56 – Seção transversal dos cordões – Processo PTAA

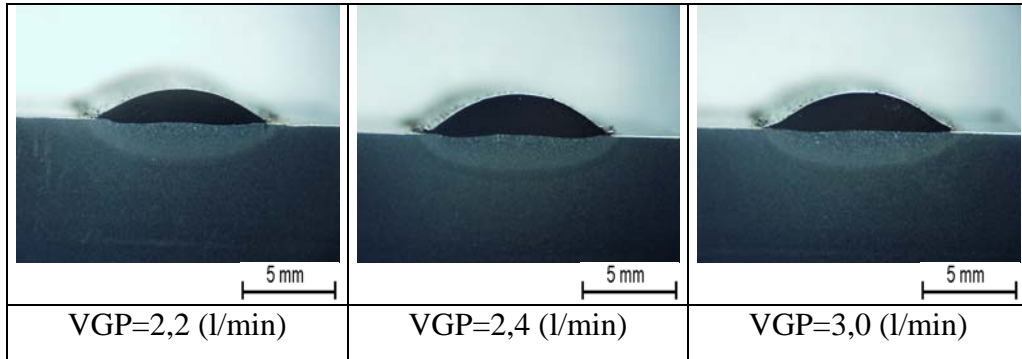


Figura 4.57 – Seção transversal dos cordões – Processo PTAP

Tabela 4.9 – Características geométricas medidas para os cordões depositados com três níveis de vazão de gás de plasma

	VGP(l/min)	U(V)	L(mm)	R(mm)	P(mm)	Pzac(mm)	δ (%)
Arame	2,2	24,4	8,4	2,4	1,0	2,9	16,98
	2,4	24,6	8,2	3,0	1,7	3,1	20,50
	3,0	25,0	7,0	2,8	1,4	3,2	25,76
Pó	2,2	19,0	9,4	1,7	0,12	1,9	6,20
	2,4	19,3	9,9	2,1	0,19	2,1	6,35
	3,0	19,7	9,6	1,9	0,2	2,2	10,24

VGP: Vazão de gás de plasma; L: largura; R: Reforço; P: Penetração

Pzac: Profundidade da ZAC; δ : Diluição

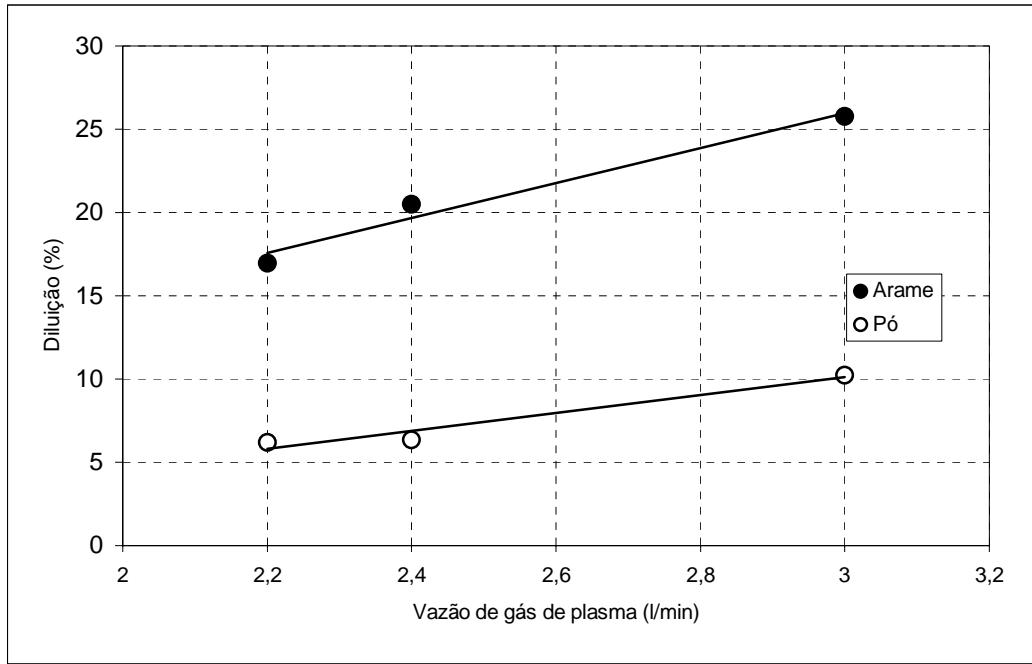
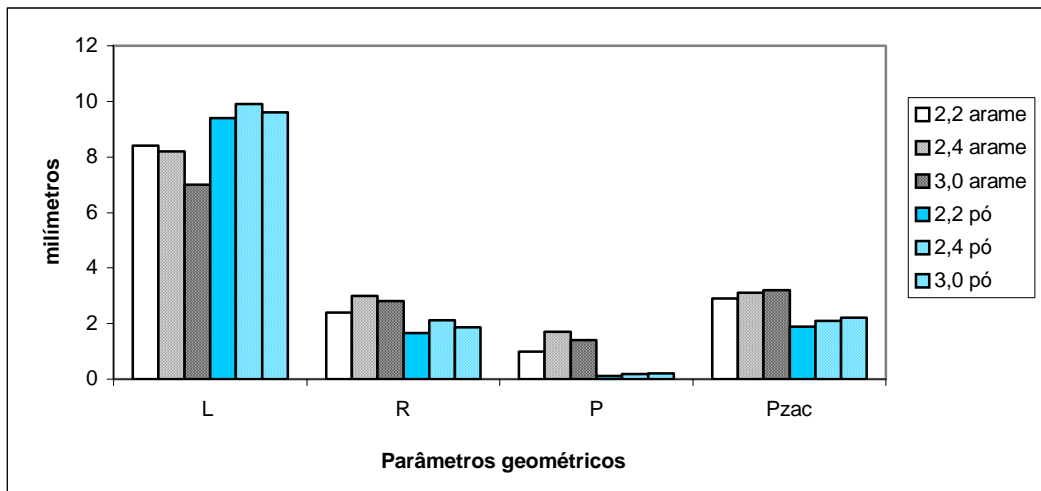


Figura 4.58 – Efeito da vazão de gás de plasma sobre o grau de diluição no processo PTAA e PTAP



L: Largura; R: Reforço; P: Penetração; Pzac: Profundidade da ZAC

Figura 4.59 – Efeito da vazão de gás de plasma sobre os parâmetros geométricos

Os bons resultados obtidos com o processo PTAP estão associados a:

- Cordões mais largos \Rightarrow maior área de recobrimento
- Menor diluição \Rightarrow depósitos com composição mais próxima da liga de aporte
- Melhor molhamento, menor convexidade \Rightarrow diminui o risco de falta de penetração/fusão entre os cordões

A análise da Tabela 4.9 permite confirmar o exposto por Deuis *et al* (1997), que afirma que um elevado valor de diluição também está associado com uma ampla zona afetada pelo calor.

As Figuras 4.60, 4.61 e 4.62 mostram as microestruturas típicas de solidificação. A microestrutura consiste de uma região, celular, dendrítica colunar e dendritas equiaxiais a partir da interface em direção a superfície.

A Figura 4.63 apresenta os valores do espaçamento interdendrítico, no centro do cordão. Quando são empregados níveis de vazão de gás de plasma de 2,2 l/min, em ambos processos, a microestrutura é mais fina. Para níveis de vazão de gás de plasma de 3,0 l/min, tanto para o processo PTAA e PTAP, a microestrutura apresentou-se mais grosseira.

O perfil de microdureza avaliado ao longo da seção transversal dos depósitos é mostrado nas Figuras 4.64 e 4.65, para o Processo PTAA e o Processo PTAP, respectivamente.

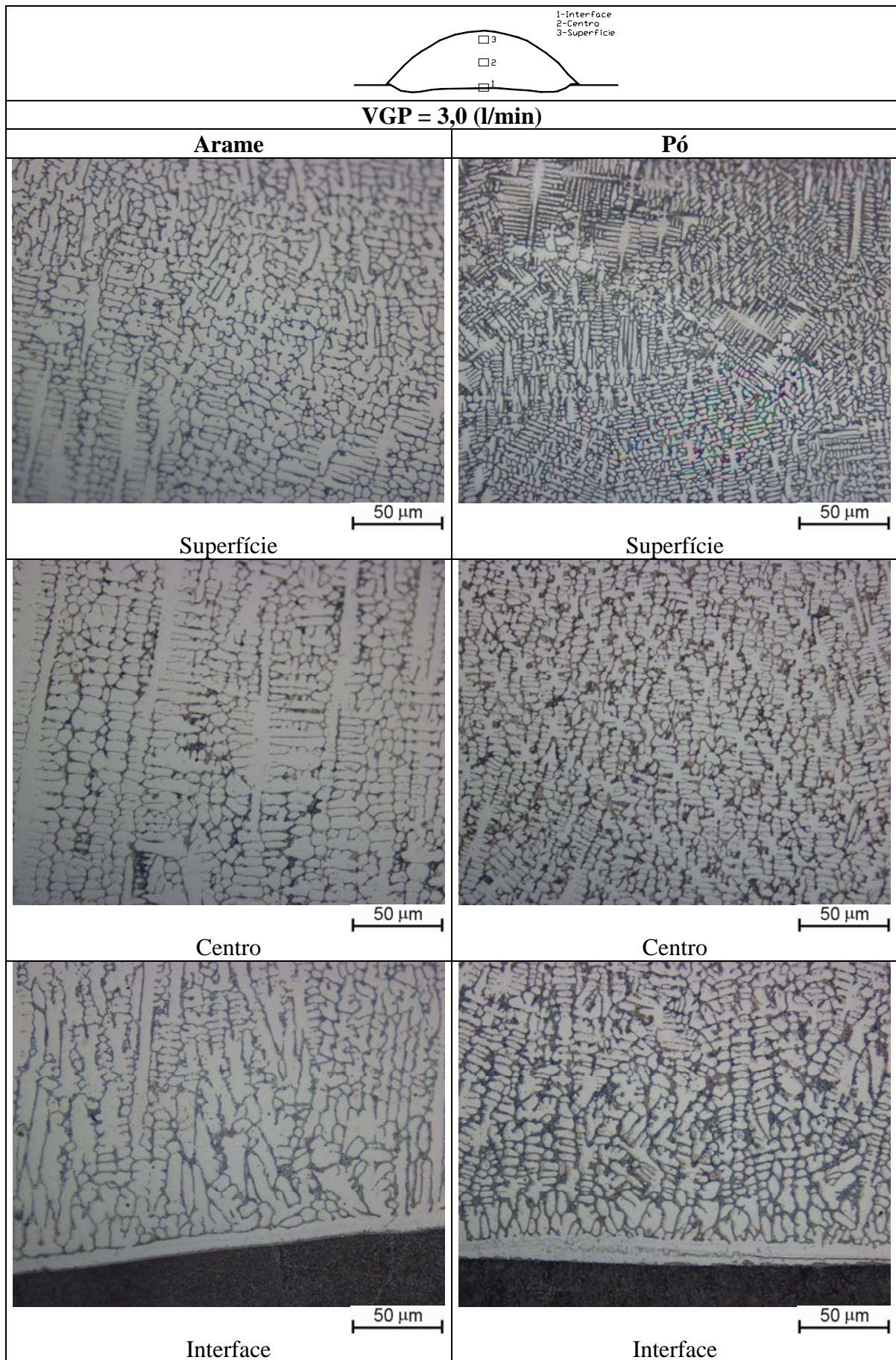


Figura 4.60 – Micrografias das amostras de Stellite 6 para o Processo PTAA e PTAP.
VGP=3,0 (l/min)

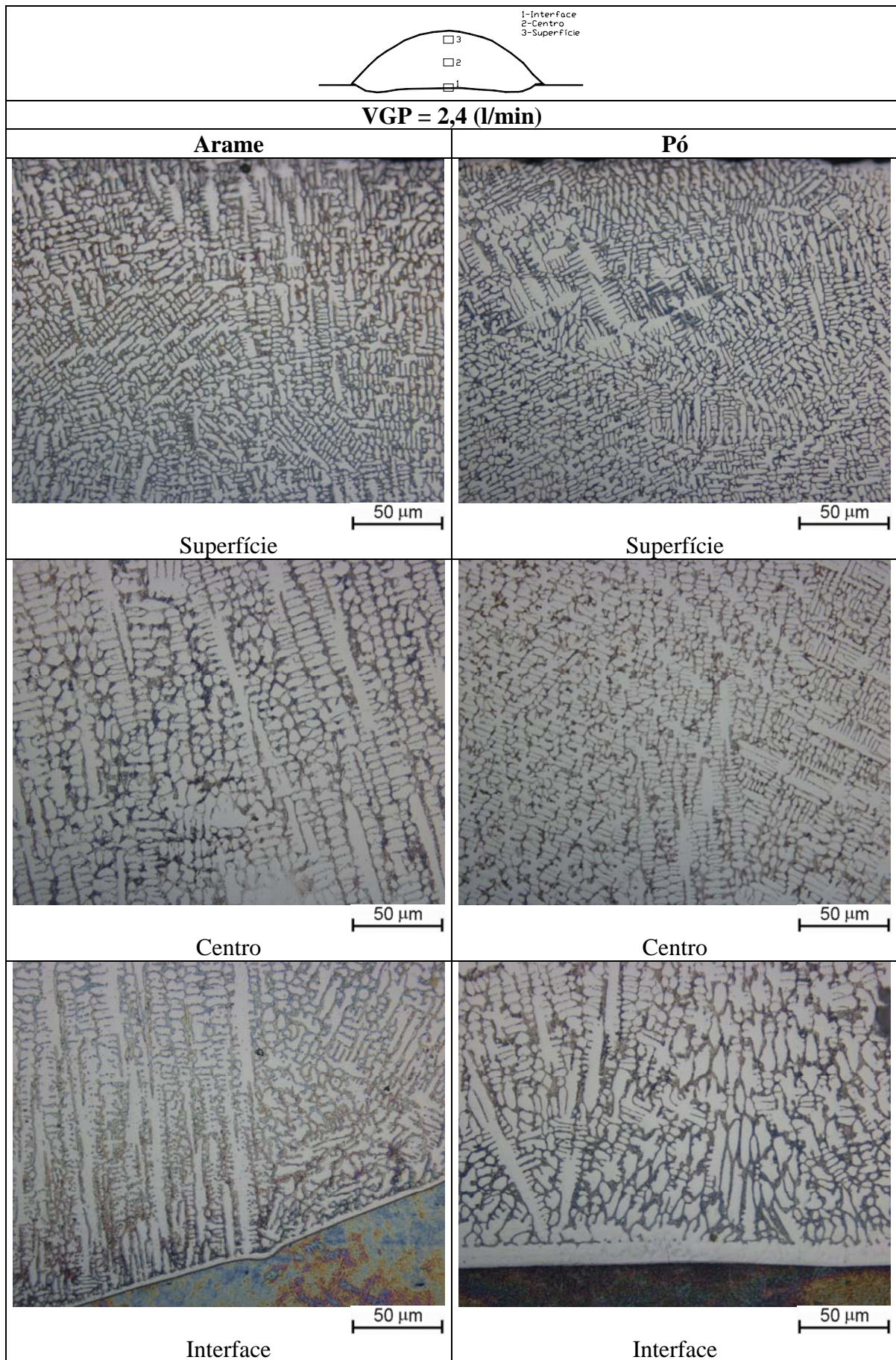


Figura 4.61 – Micrografias das amostras de Stellite 6 para o Processo PTAA e PTAP.
VGP=2,4 (l/min)

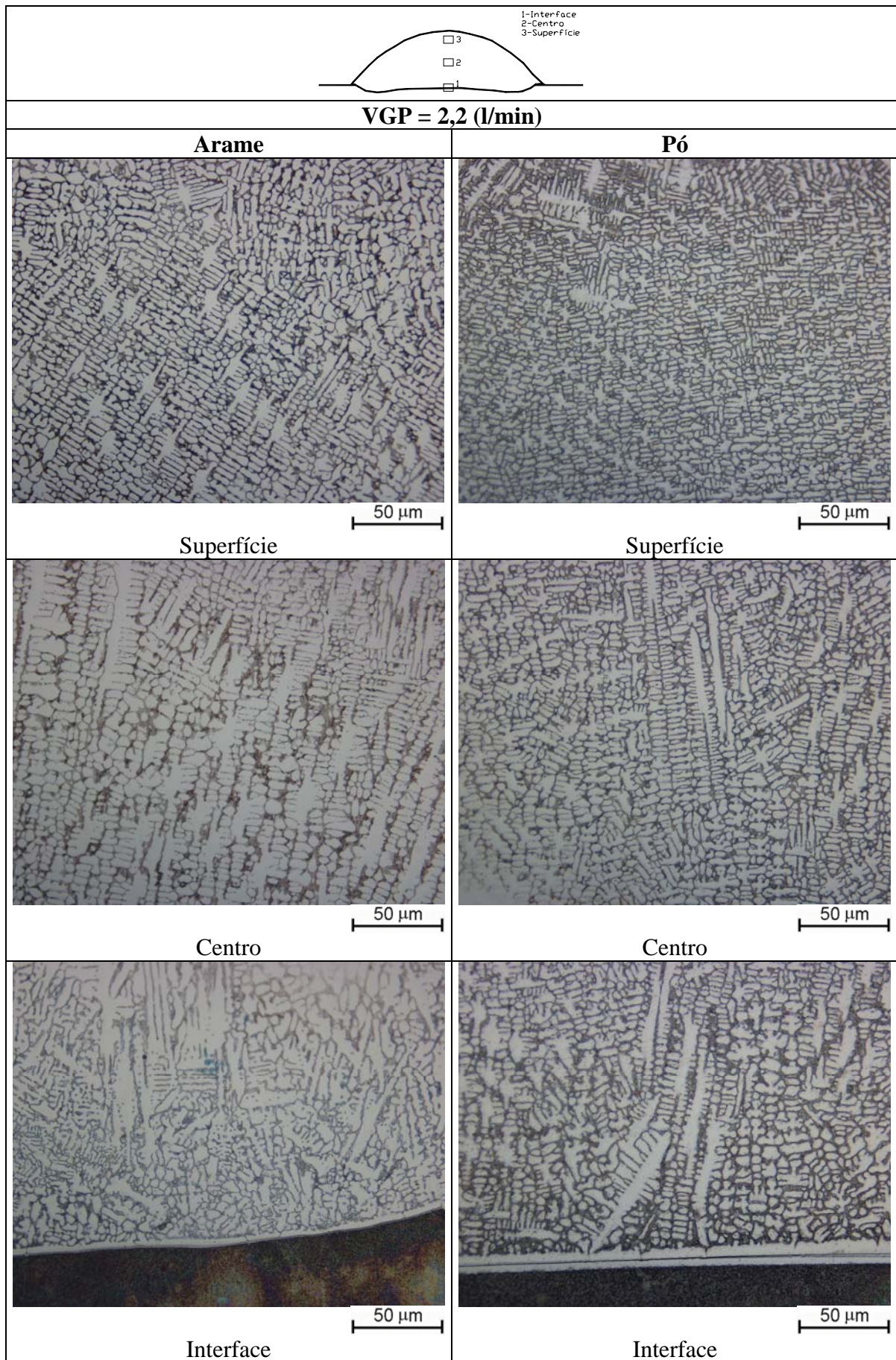


Figura 4.62 – Micrografias das amostras de Stellite 6 para o Processo PTAA e PTAP.
VGP=2,2 (l/min)

A análise da Figura 4.64 reforçada com a análise de variância, Tabela 4.10, indica que, de uma forma geral, a vazão de gás de plasma afeta significativamente na dureza. Por outro lado, a análise da Figura 4.65, que corresponde ao processo PTAP, reforçada com a Tabela 4.11, indica que a vazão de gás de plasma não afeta significativamente na dureza. Depósitos processados com o processo PTAA, produziram valores de dureza menores, conforme esperado pelas estruturas mais grosseiras e maiores graus de diluição.

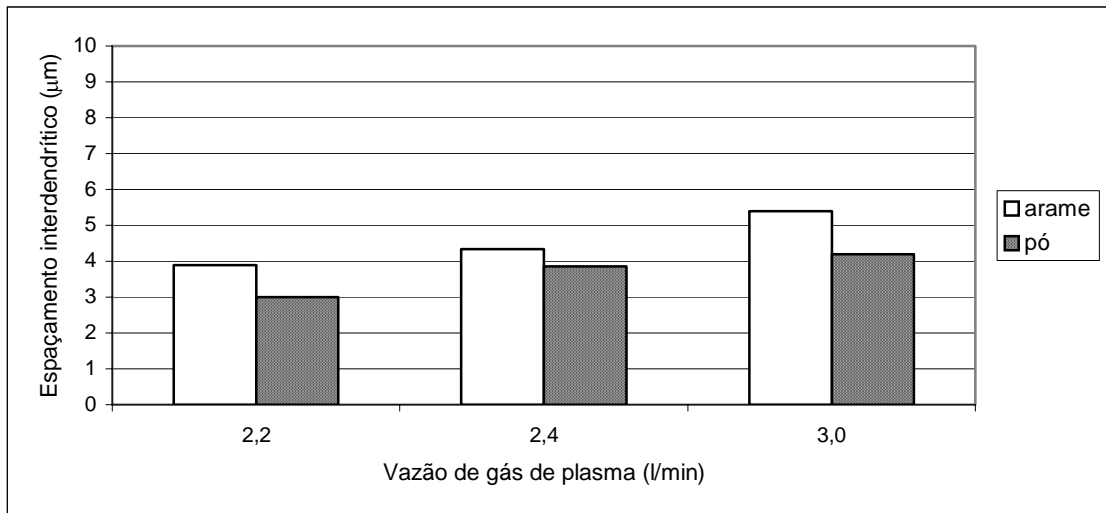


Figura 4.63 – Espaçamento dos braços dendríticos no centro dos depósitos. Comparação entre o processo PTAA e PTAP para três níveis de vazão de gás de plasma

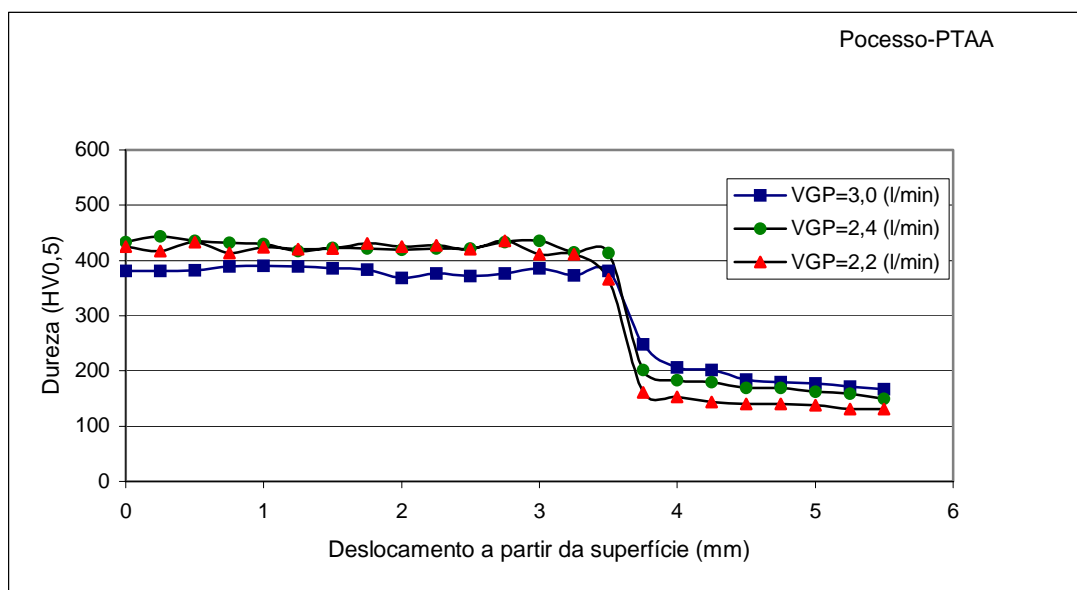


Figura 4.64 – Efeito da vazão de gás de plasma sobre a dureza no processo PTAA

Tabela 4.10 – Resultados de análises de variância para a dureza média do MS – PTAA

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma dos quadrados</i>	<i>Graus de liberdade</i>	<i>Média dos quadrados Fobservado</i>	<i>F crítico</i>
Vazão de gás de plasma	18214,93	2	9107,463	151,9637 > 3,2381
Residual	2337,341	39	59,93183	
Total	20552,27	41		

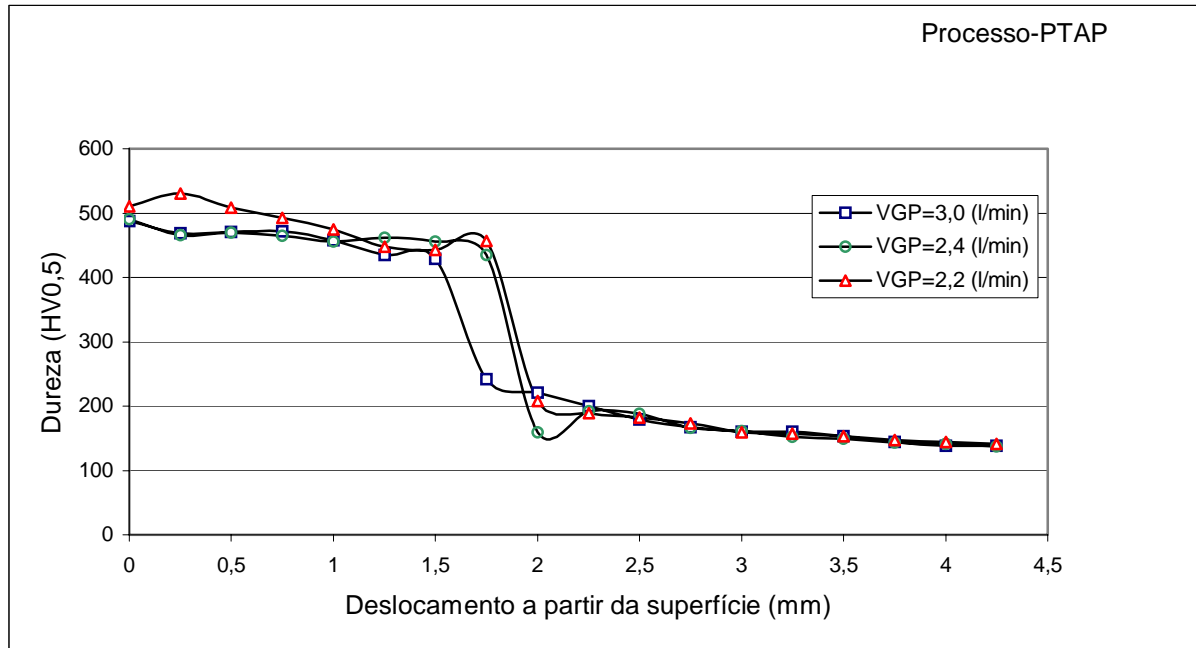


Figura 4.65 – Efeito da vazão de gás de plasma sobre a dureza no processo PTAP

Tabela 4.11 – Resultados de análises de variância para a dureza média do MS – PTAP

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma dos quadrados</i>	<i>Graus de liberdade</i>	<i>Média dos quadrados Fobservado</i>	<i>F crítico</i>
Vazão de gás de plasma	2729,185	2	1364,593	2,388627 < 3,554561
Residual	10283,17	18	571,2875	
Total	13012,36	20		

Comprovou-se que o processo PTAP gera uma microestrutura mais refinada e conseqüentemente durezas mais elevadas que o processo PTAA, fato que também foi observado por Silvério *et al* (2003).

4.2.5 Análise da influência da velocidade de soldagem

4.2.5.1 Introdução

Os efeitos que a velocidade de soldagem exerce sobre a diluição e sobre as características geométricas das soldas são estudados neste item. Para tanto, são analisadas as variações na diluição das soldas para três níveis de velocidades de soldagem e para dois tipos de bicos constritores.

4.2.5.2 Procedimento experimental

A influência da velocidade de soldagem foi avaliada a partir dos valores de diluição, dimensões do cordão (L, R, P), profundidade da ZAC, e dureza. Os parâmetros estão indicados na Tabela 4.12. Foram utilizados três níveis de velocidade de soldagem e dois tipos de bicos constritores. Realizaram-se testes sobre chapas de aço carbono da classe ABNT 1020. Essas foram cortadas nas dimensões de 12,5x60x155mm e esmerilhadas para a remoção da camada de óxido.

Tabela 4.12 – Variáveis e parâmetros de soldagem - Influência da velocidade de soldagem

Variáveis		
Corrente de soldagem	I(A)	160
Velocidade de soldagem	Vs(cm/min)	10, 15 e 20
Gás de plasma	VGP(l/min)	2,4
Gás de proteção	GPr(l/min)	10
Gás de arraste	GTr(l/min)	2
Taxa de alimentação	Tx(kg/h)	1,4
Diâmetro do bico constritor/ângulo de convergência	d(mm)/(°)	4,8/30-4,8/60
Distância bico-peça	DBP(mm)	10
Recuo	Rc(mm)	2,4

4.2.5.3 Análises dos resultados

As Figuras 4.66 e 4.67 mostram a seção transversal dos cordões obtidos com o processo PTAP para três níveis de velocidade de soldagem e dois bicos constritores: 30 e 60°. A Tabela 4.13 apresenta as dimensões do cordão e ZAC, para três níveis de velocidade de soldagem.

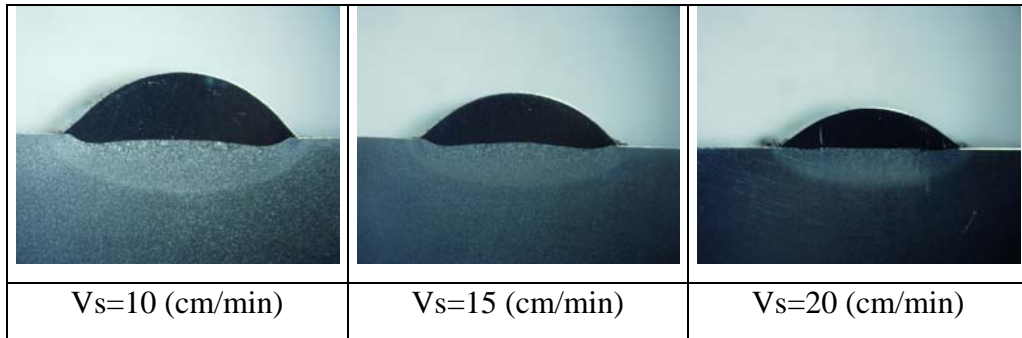


Figura 4.66 – Seção transversal dos cordões para um bico de 30°

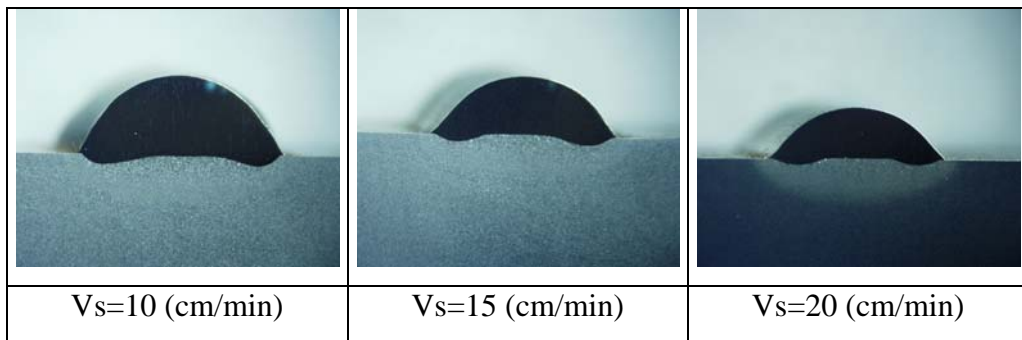


Figura 4.67 – Seção transversal dos cordões para um bico de 60°

Tabela 4.13 – Características geométricas medidas para os cordões depositados com três níveis de velocidade de soldagem e dois bicos constritores

Tipo de Bico	Vs(cm/min)	L(mm)	R(mm)	P(mm)	Pzac(mm)	δ (%)	H'(mm) H' = R+Pc
Bico-30	10	11,81	3,35	0,48	4,6	11,4	3,4
	15	10,19	2,36	0,32	3,42	7,5	2,52
	20	9,25	2	0,13	2,26	2,5	2
Bico-60	10	10,13	4	0,53	2,54	9,4	4
	15	9,6	3	0,47	2,68	8,8	3
	20	8,9	2,57	0,33	2,4	6,9	2,6

Vs: Velocidade de soldagem; L: largura; R: Reforço; P: Penetração

Pzac: Profundidade da ZAC; δ : Diluição; H'=distância medida aproximadamente no centro do cordão; Pc: Penetração no centro do cordão

As Figuras 4.68 e 4.69 mostram os cordões com o bico constritor de 60°, utilizando duas velocidades de soldagem. Enquanto que no cordão realizado com baixa velocidade há um severo desvio de linearidade do cordão (veja a Figura 4.68) esse efeito não é significativo no cordão obtido com maior velocidade (Figura 4.69)

Na tentativa de explicar tal fenômeno, foi realizado um cordão com velocidade ainda maior (20 cm/min), que apresentou-se bastante retilíneo. Assim, ficou descartada uma primeira hipóteses que era de alguma irregularidade na alimentação de pó.

Ao comparar a vista de topo do cordão depositado com baixa velocidade (10 cm/min), Figura 4.68, com aquele de alta velocidade (15 cm/min), Figura 4.69 é possível perceber que naquele a zona aquecida da chapa é maior. Isso levou a pensar que o desvio de linearidade fosse resultado de sopro magnético. Isto foi confirmado ao repetir a solda nas mesmas condições mas, desta vez, usando uma chapa de maiores dimensões (veja a Figura 4.70).

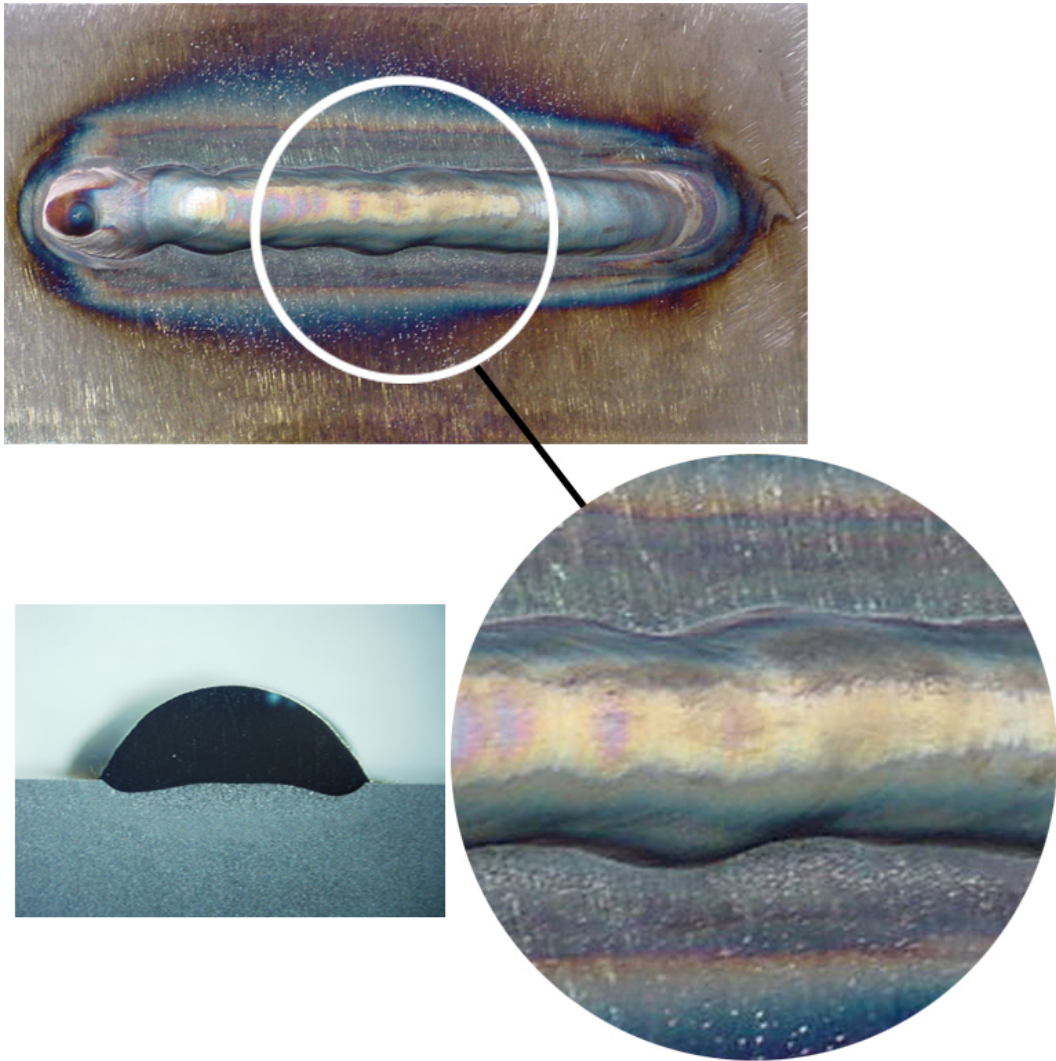


Figura 4.68 – Aspecto do cordão para uma $V_s=10$ cm/min, bico 60°

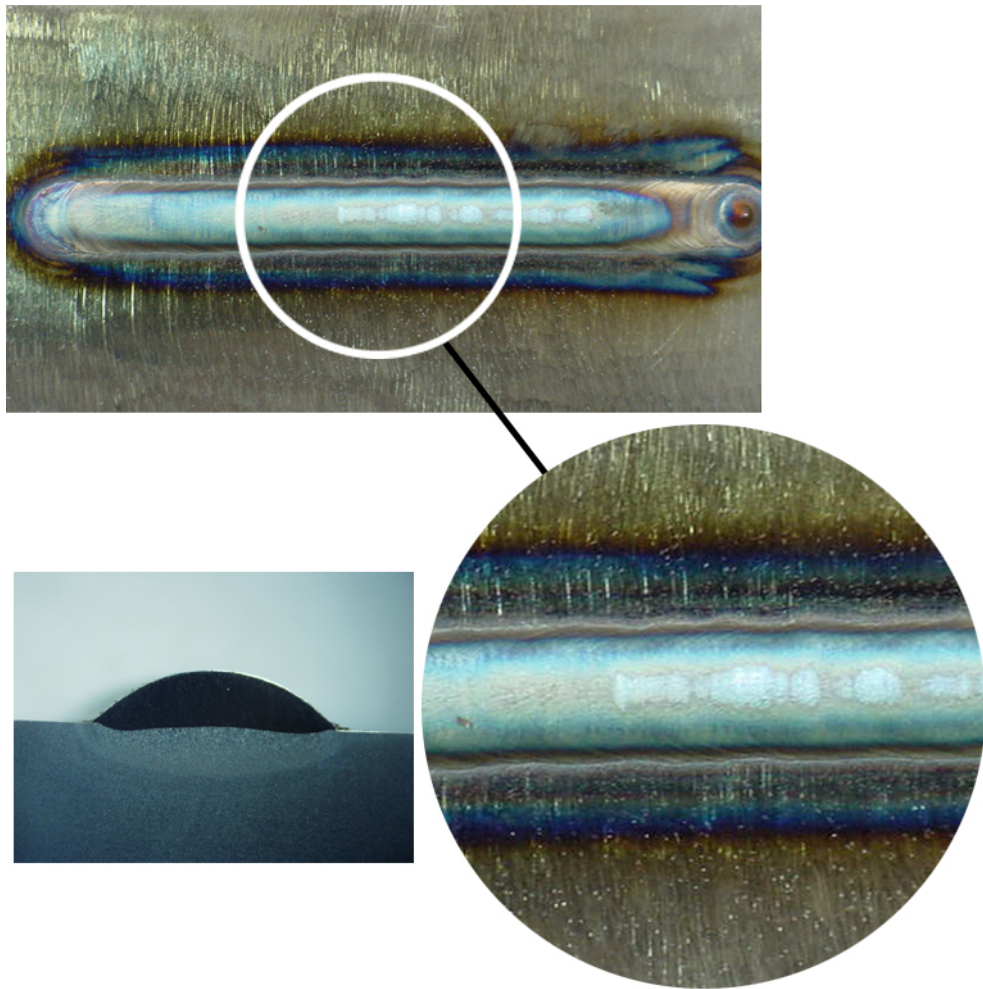


Figura 4.69 – Aspecto do cordão para uma $V_s=15$ cm/min, bico 60°

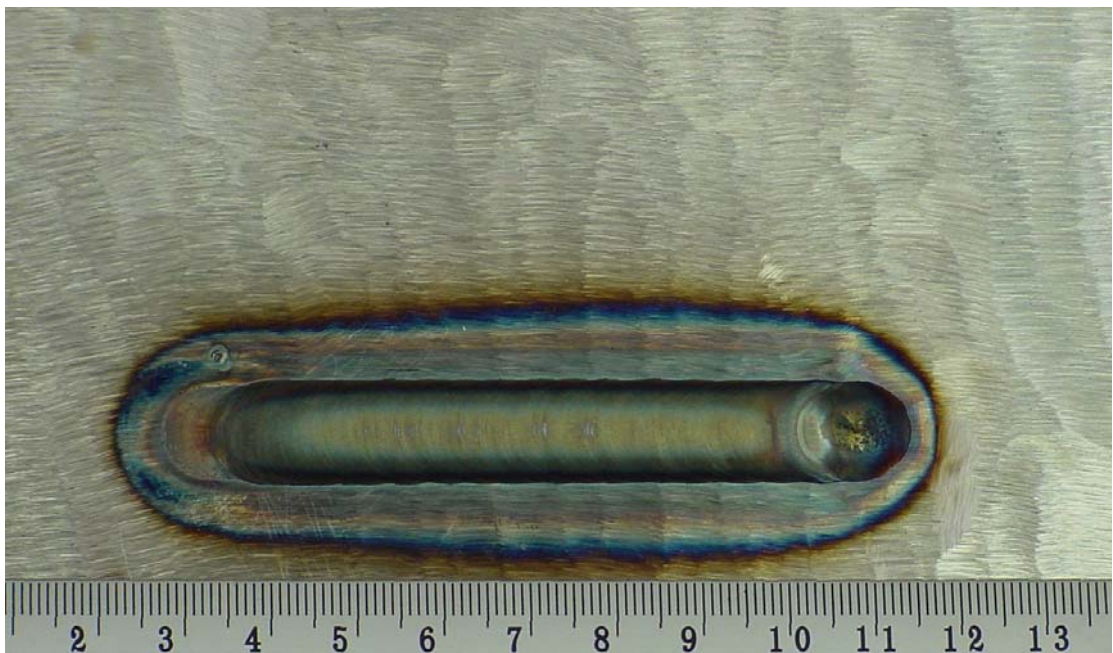
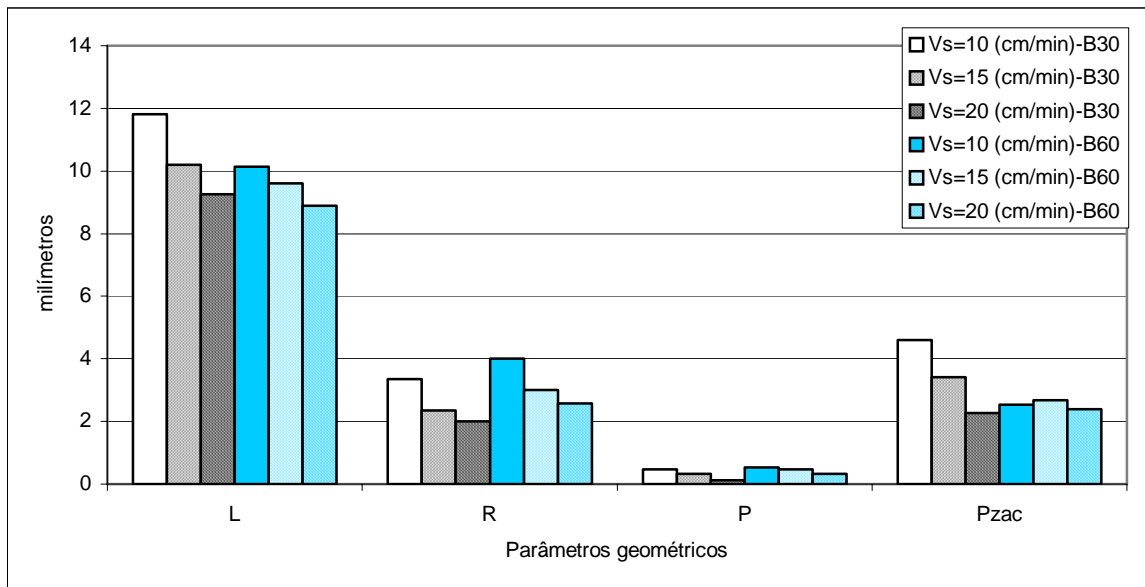


Figura 4.70 – Cordão realizado sobre chapa de 230x130x12,5 mm. $V_s = 10$ cm/min

Nota-se na Figura 4.71 que à medida que a velocidade de soldagem aumenta, a largura da solda, reforço, penetração, profundidade da ZAC e diluição diminuem, independente do bico

constritor utilizado. Os maiores valores na largura foram obtidos para um bico constritor de 30°. Os menores valores no reforço e penetração, são obtidos para um bico constritor de 30°.

Por outro lado, a utilização de um bico constritor de 60°, apresentou os valores mais baixos na profundidade da ZAC, onde é possível observar, que para este tipo de bico constritor, a velocidade de soldagem não tem uma influência significativa sobre a profundidade da ZAC. Já quando é empregado o bico constritor de 30°, pela análise da Figura 4.71, percebe-se um efeito significativo na profundidade da ZAC.



L: Largura; R: Reforço; P: Penetração; Pzac: Profundidade da ZAC; Vs: Velocidade de soldagem

B30: Bico constritor de 30°; B60: Bico constritor de 60°

Figura 4.71 – Efeito do fator velocidade de soldagem sobre os parâmetros geométricos do cordão de solda

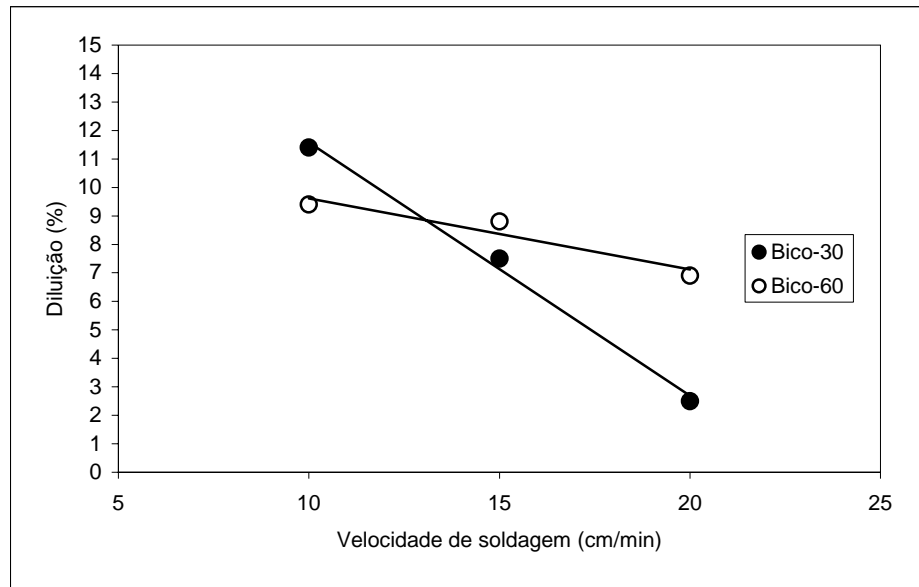


Figura 4.72 – Efeito do fator velocidade de soldagem sobre o grau de diluição

Em relação ao grau de diluição, o efeito da velocidade foi mais significativo quando foi empregado o bico constritor de 30°. Pela análise da Figura 4.72, para uma velocidade de soldagem de 20 cm/min, o menor valor de diluição corresponde ao bico constritor de 30°.

As Figuras 4.73 e 4.74 mostram o perfil de microdureza avaliado ao longo da seção transversal dos cordões, para os dois bicos constritores utilizados. A velocidade de soldagem não apresentou efeitos significativos sobre o perfil de microdureza, para os três níveis de velocidade de soldagem testados, devido aos baixos valores de diluição obtidos em todos os casos. O deslocamento entre as curvas de dureza corresponde ao tamanho do reforço e à penetração no centro do cordão (H').

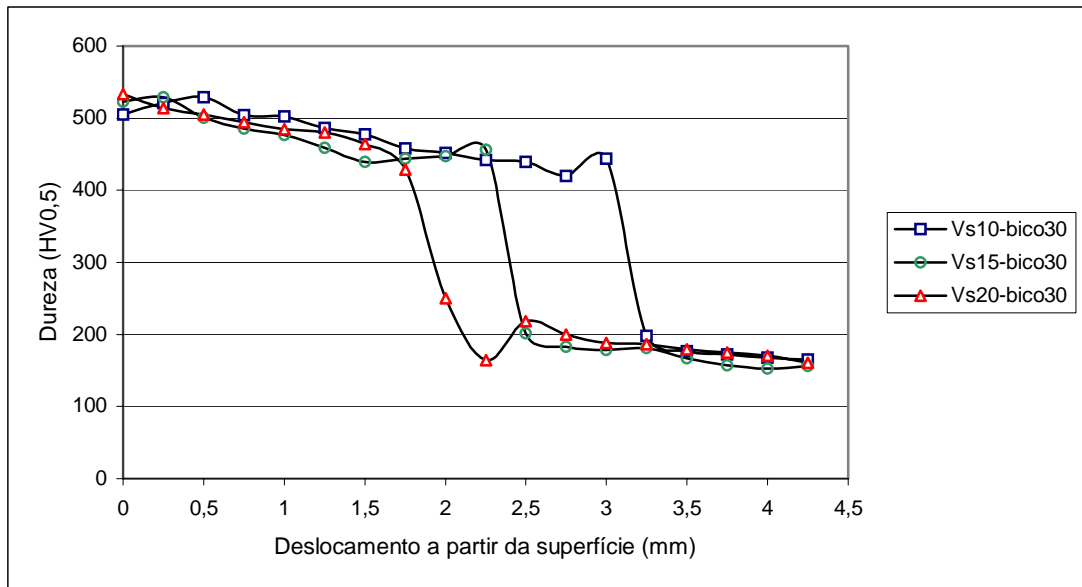


Figura 4.73 – Efeito da velocidade de soldagem sobre a dureza, com bico constritor de 30°

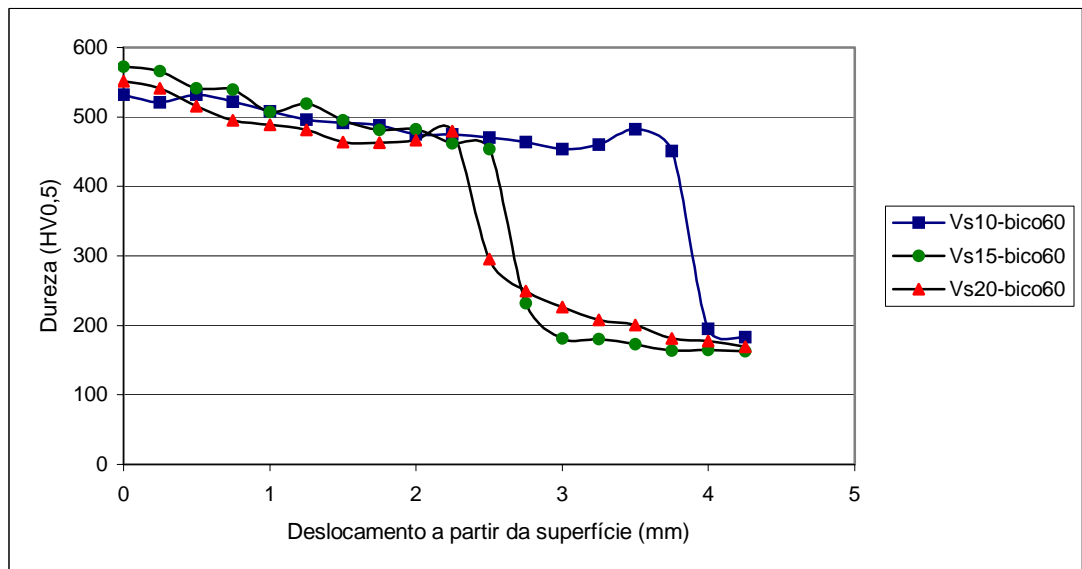


Figura 4.74 – Efeito da velocidade de soldagem sobre a dureza, com bico constritor de 60°

4.2.6 Análise da influência da corrente de soldagem

4.2.6.1 Introdução

Os trabalhos de Hallén (1999) e da PLASMA TEAM (2004) foram referenciais para estudar o efeito da corrente de soldagem e da taxa de alimentação sobre o grau de diluição dos depósitos. Deuis *et al* (1997) relatam que deve ser determinado um valor adequado da corrente de soldagem para uma determinada taxa de alimentação de pó. Quando se trabalha com baixos valores da corrente de soldagem, o calor gerado é insuficiente como para fundir o pó ou a superfície do substrato. Desta forma o pó injetado não é incorporado na poça fundida. Quando se trabalha com valores de corrente acima dos valores operacionais, as partículas pequenas são vaporizadas no arco plasma e o rendimento de deposição diminui.

Para confrontar a literatura especializada, foram conduzidos alguns experimentos para três níveis de corrente, dois níveis de taxa de alimentação e dois tipos de bicos constritores: 30° e 60°. Em seguida os resultados são comparados com o processo PTAA.

4.2.6.2 Procedimento experimental

Foram conduzidos ensaios com o Processo Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó para conferir o efeito da corrente de soldagem sobre o grau de diluição e em seguida foram comparados estes resultados com o Processo Plasma de Arco Transferido Alimentado com Arame. A influência da corrente de soldagem foi avaliada a partir dos valores de diluição, dimensões do cordão (L, R, P), profundidade da ZAC e dureza, medidos em depósitos realizados com os parâmetros indicados na Tabela 4.14. Realizaram-se testes sobre chapas de aço carbono da classe ABNT 1020. Essas foram cortadas nas dimensões de 12,5x60x155mm e esmerilhadas para a remoção da camada de óxido.

Tabela 4.14 – Variáveis e parâmetros de soldagem-Influência da corrente de soldagem

Variáveis Processo Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó		
Corrente de soldagem	I(A)	160,170,180
Velocidade de soldagem	Vs(cm/min)	20
Gás de plasma	VGP(l/min)	2,4
Gás de proteção	GPr(l/min)	10
Gás de arraste	GTr(l/min)	2
Taxa de alimentação	Tx(kg/h)	1,17; 1,53
Diâmetro do bico constritor/ângulo de convergência	d(mm)/(°)	4,8/30; 4,8/60
Distância bico-peça	DBP(mm)	10
Recuo	Rc(mm)	2,4
Variáveis Processo Plasma de Arco Transferido Alimentado com Arame		
Diâmetro do arame (tubular)	mm	1,2
Velocidade de arame	Va(m/min)	3,0
Taxa de alimentação	Tx(kg/h)	1,17; 1,53
Diâmetro do bico constritor	d(mm)	3,2

4.2.6.3 Análises dos resultados

4.2.6.3.1 Análise dos depósitos para o processo PTAP.

A Tabela 4.15 apresenta os resultados das condições geométricas dos cordões para os processos de soldagem (PTAA e PTAAP) e a Figura 4.75 mostra a seção transversal dos cordões para as seguintes condições de soldagem: Corrente de 160 A com taxa de alimentação de 1,17 e 1,5 kg/h.

As Figuras 4.76 e 4.77 indicam o efeito na largura, reforço, penetração e profundidade da ZAC, para diferentes níveis de corrente, taxa de alimentação e tipo de bico constritor. A largura do depósito aumenta levemente com a corrente de soldagem. Os maiores valores de largura são obtidos para altas corrente e altas de taxas de alimentação e correspondem a um bico de 30°. Os menores valores na penetração correspondem a um bico de 30° e para uma taxa de alimentação de 1,5 kg/h. A profundidade da ZAC aumenta em função da corrente de soldagem.

Em seguida foi medido o grau de diluição para cada uma das doze mostras testadas e foi observado que as soldas realizadas com um bico de 30°, alcançaram um menor grau de diluição, comparadas com as soldas realizadas com um bico de 60°.

A análise da Figura 4.78, indica que a corrente de soldagem afeta significativamente no grau de diluição. Isto se explica pelo fato que um aumento na corrente está associado num aumento na energia necessária para fundir o substrato e produzir um aumento na penetração.

Verificou-se a influência da taxa de alimentação, fazendo testes para 1,17 e 1,5 (kg/h). A análise da Figura 4.78 permite perceber um efeito significativo da taxa de alimentação sobre o grau de diluição. Na medida que a taxa de alimentação aumenta, o grau de diluição diminui.

As Figuras 4.79, 4.80, 4.81 e 4.82 mostram o perfil de microdureza avaliado ao longo da seção transversal dos cordões. Para os três níveis de corrente testados, o perfil de microdureza não apresentou variações significativas, devido aos baixos valores de diluição obtidos.

Tabela 4.15 – Características geométricas medidas para os cordões depositados com o processo PTAP e PTAA

Processo-PTAP								
		Tx(kg/h)	I(A)	L(mm)	R(mm)	P(mm)	Pzac(mm)	δ(%)
CP1/B30	Bico-30	1,17	160	9,2	1,7	0,26	2,1	4,5
CP2/B30			170	9,3	1,8	0,16	2,5	6,5
CP3/B30			180	9,5	1,8	0,23	2,9	10,3
CP4/B30		1,5	160	9,25	2	0,13	2,26	2,5
CP5/B30			170	9,55	2	0,1	2,76	2,5
CP6/B30			180	9,64	2,1	0,15	2,86	3,2
CP7/B60	Bico-60	1,17	160	8,7	2,3	0,54	2,36	11,5
CP8/B60			170	9,0	2	0,45	2,84	12,5
CP9/B60			180	9,3	2	0,5	3,03	12,8
CP10/B60		1,5	160	8,90	2,57	0,33	2,4	6,9
CP11/B60			170	9,15	2,57	0,36	2,8	7,4
CP12/B60			180	9,37	2,48	0,39	3,0	7,7
Processo-PTAA								
		Tx(kg/h)	I(A)	L(mm)	R(mm)	P(mm)	Pzac(mm)	δ(%)
CP1		1,17	160	7,1	2,16	1,8	3,3	38,4
CP2			170	7,14	2	2,4	3,82	48,9
CP3			180	6,98	2,06	1,9	3,44	43,3
CP4		1,5	160	7,9	2,6	1,71	4,14	31,2
CP5			170	7,5	2,4	1,17	3,56	25,7
CP6			180	7,26	2,16	2,38	3,7	46,4

Tx: Taxa de alimentação; I: Corrente de soldagem; L: Largura; R: Reforço; P: Penetração
Pzac: Profundidade da ZAC; δ: Diluição; CP: Corpo de prova

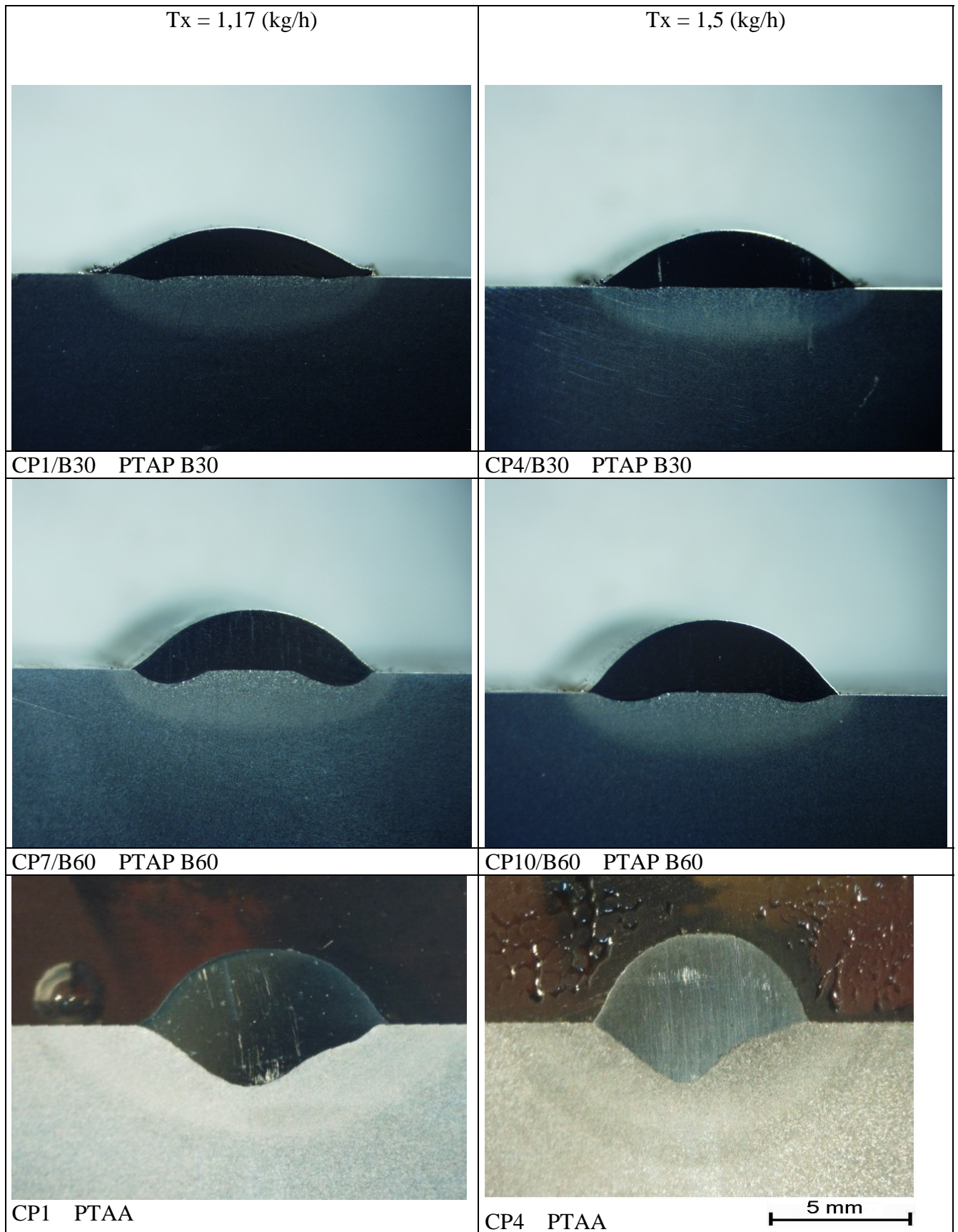
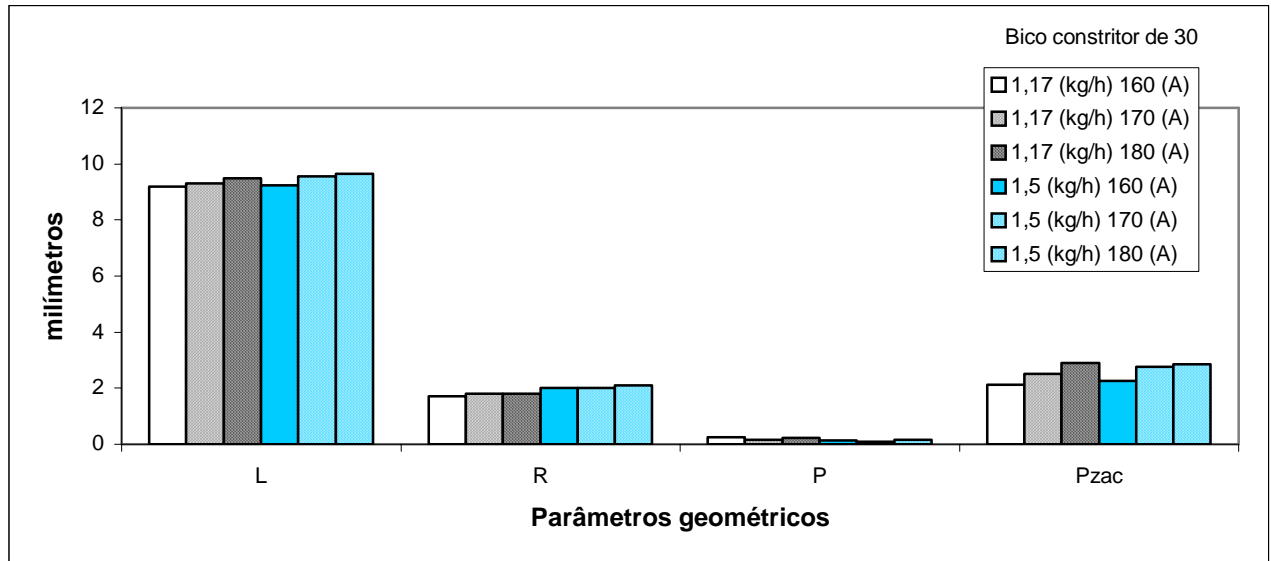
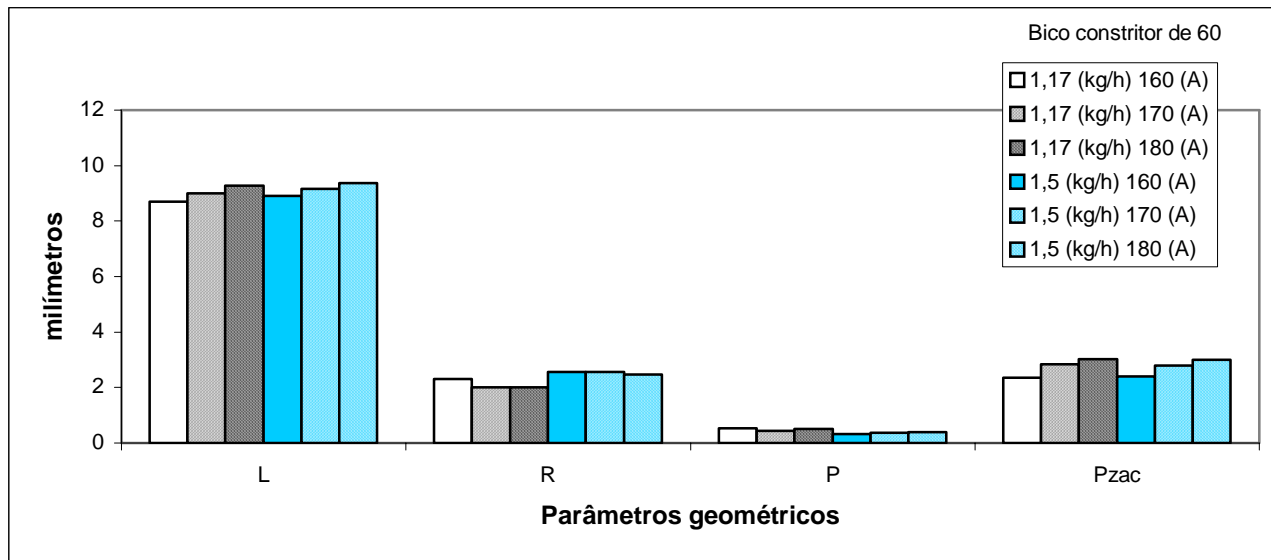


Figura 4.75 – Aspecto da seção transversal do cordão obtido no processo PTAP e PTAA: coluna da esquerda, com taxa de alimentação de 1,17 kg/h; coluna da direita, com taxa de alimentação de 1,5 kg/h. Todos efetuados com 160 A.



L: Largura; R: Reforço; P: Penetração; Pzac: Profundidade da ZAC

Figura 4.76 – Condições geométricas dos depósitos-Processo PTAP-Bico constritor de 30°



L: Largura; R: Reforço; P: Penetração; Pzac: Profundidade da ZAC

Figura 4.77 – Condições geométricas dos depósitos-Processo PTAP-Bico constritor de 60°

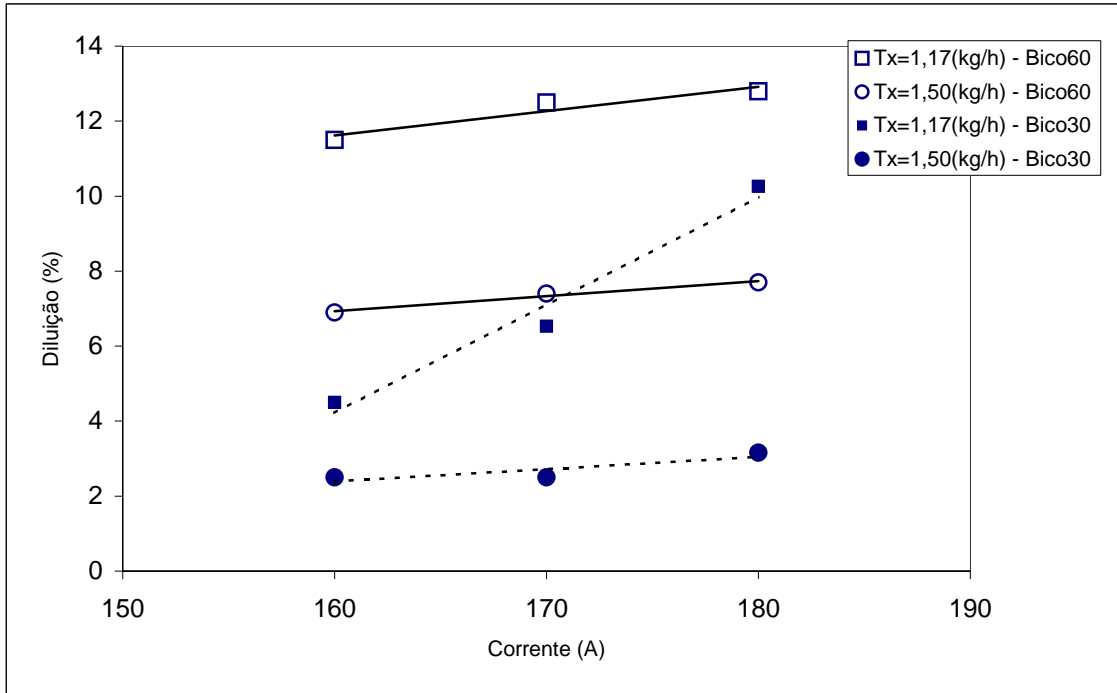


Figura 4.78 – Grau de diluição em função da corrente, taxa de alimentação e bico constritor

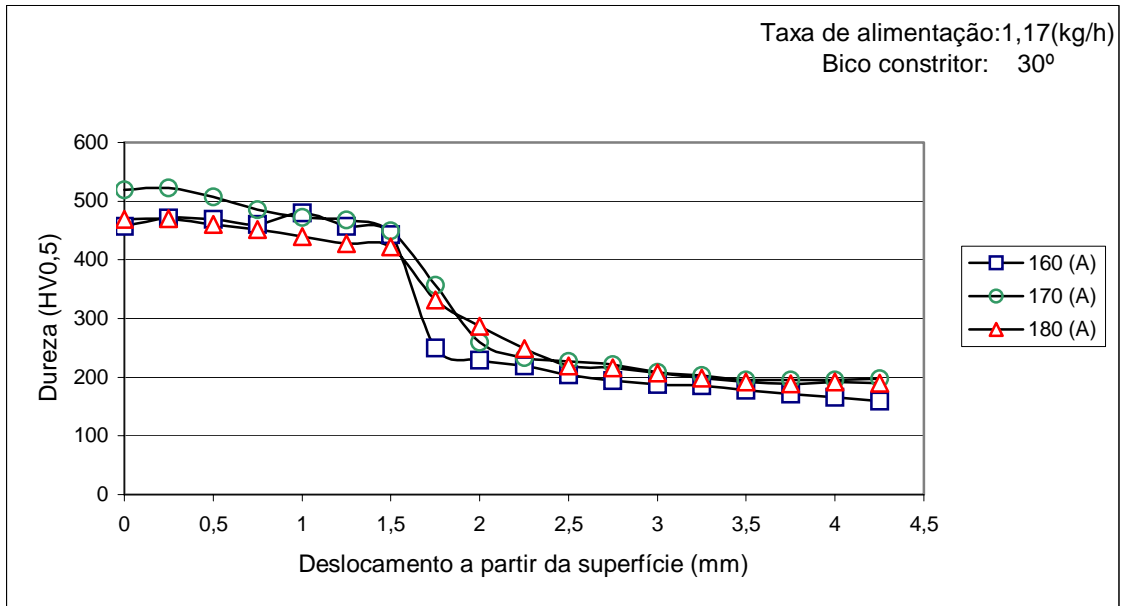


Figura 4.79 – Efeito do fator corrente de soldagem sobre a dureza com bico constritor 30°

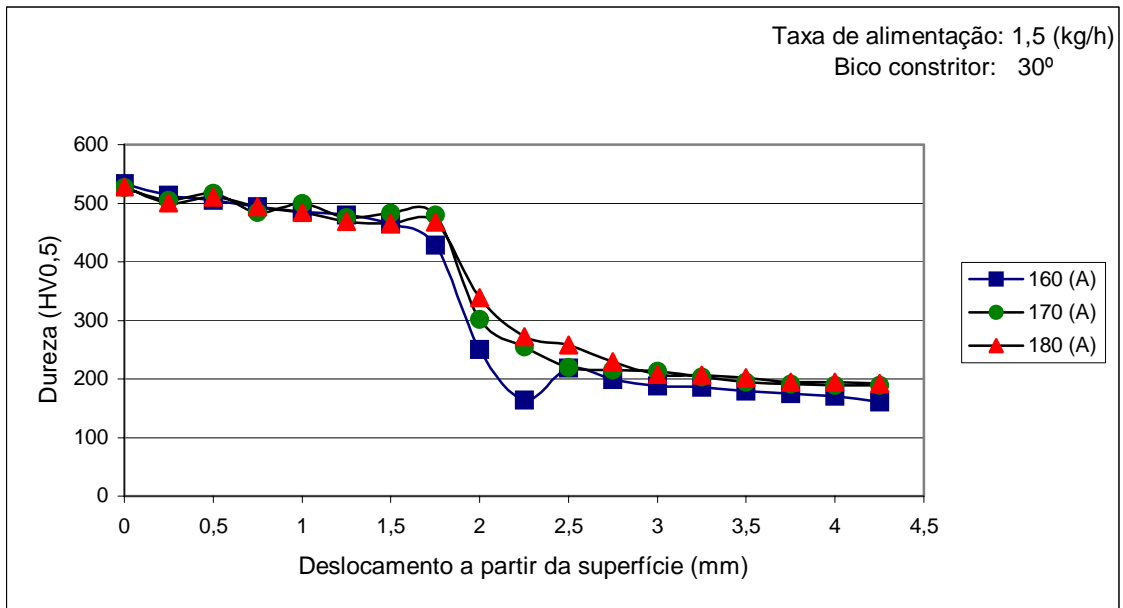


Figura 4.80 – Efeito do fator corrente de soldagem sobre a dureza com bico constritor 30°

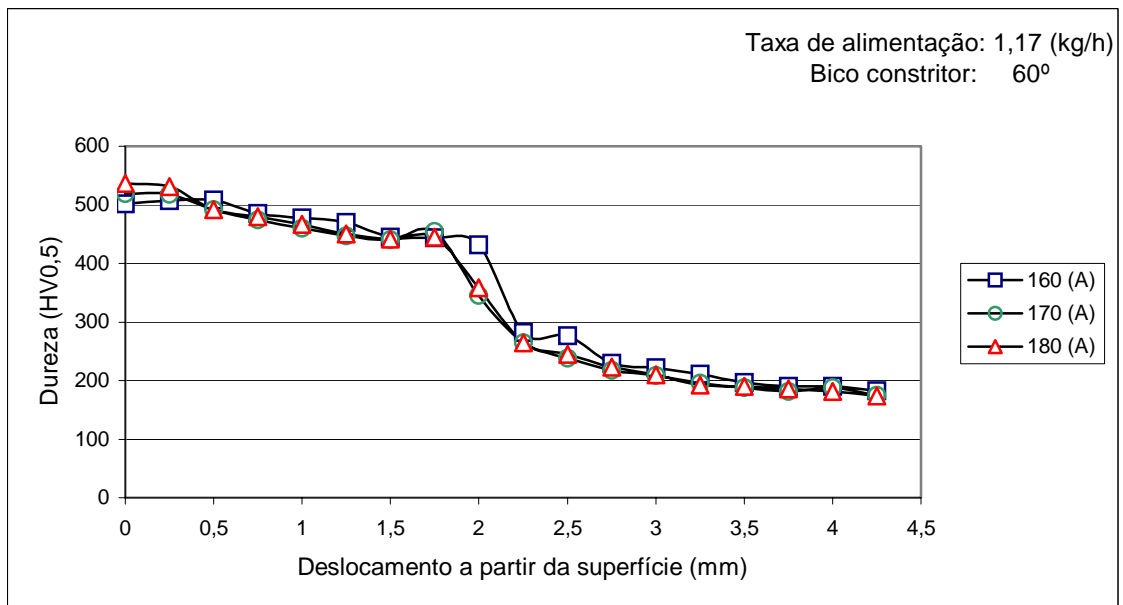


Figura 4.81 – Efeito do fator corrente de soldagem sobre a dureza com bico constritor 60°

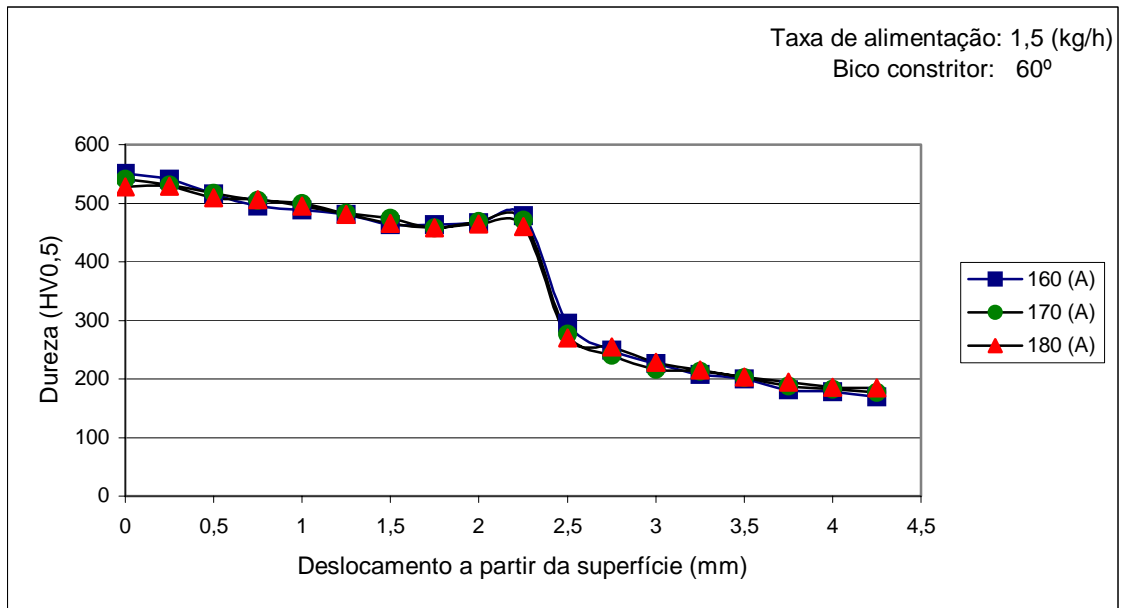
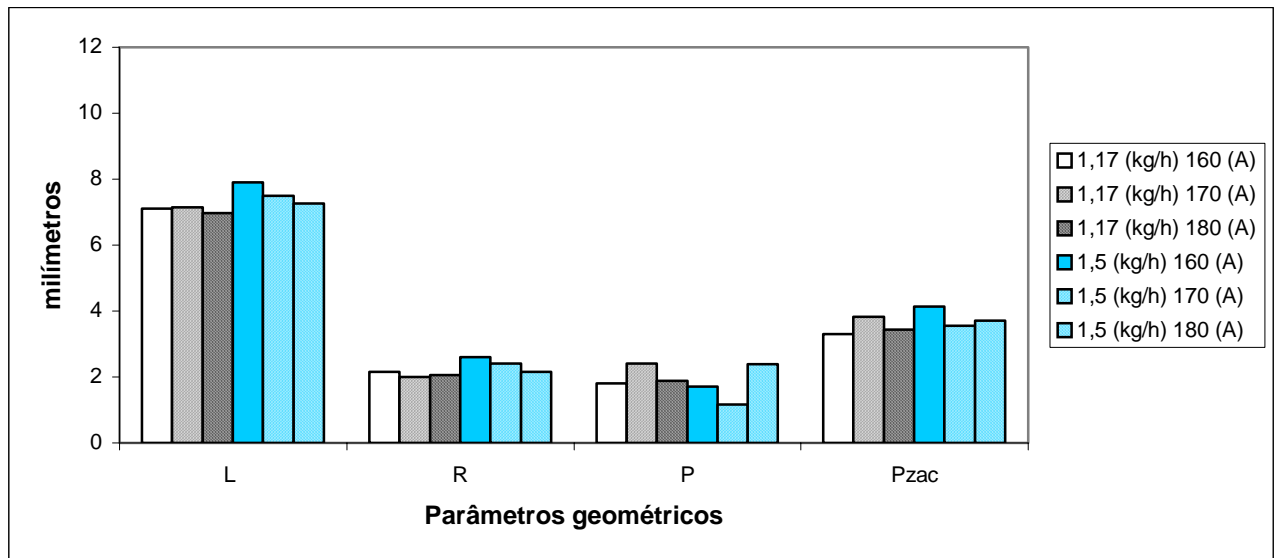


Figura 4.82 – Efeito do fator corrente de soldagem sobre a dureza com bico constritor 60°

4.2.6.3.2 Análise dos depósitos para o processo PTAA. A Figura 4.83 corresponde a valores de largura, reforço penetração e profundidade da ZAC quando é empregado o processo PTAA. Os ensaios foram conduzidos para dois níveis de taxa de alimentação (1,17 e 1,5 kg/h) e três níveis de corrente de soldagem (160, 170 e 180 A). Observaram-se valores de largura menores (cordões mais estreitos) em relação aqueles obtidos com o processo PTAP.

Valores de reforço, penetração e profundidade da ZAC foram maiores, comparados com os resultados obtidos com o processo PTAP.

Em relação ao grau diluição, Figura 4.84, maiores níveis são conseguidos no processo PTAA, isto devido a que o grau de penetração dos depósitos produzidos através do processo PTAA são maiores a aqueles obtidos pelo processo PTAP.



L: Largura; R: Reforço; P: Penetração; Pzac: Profundidade da ZAC

Figura 4.83 – Condições geométricas dos depósitos-Processo PTAA

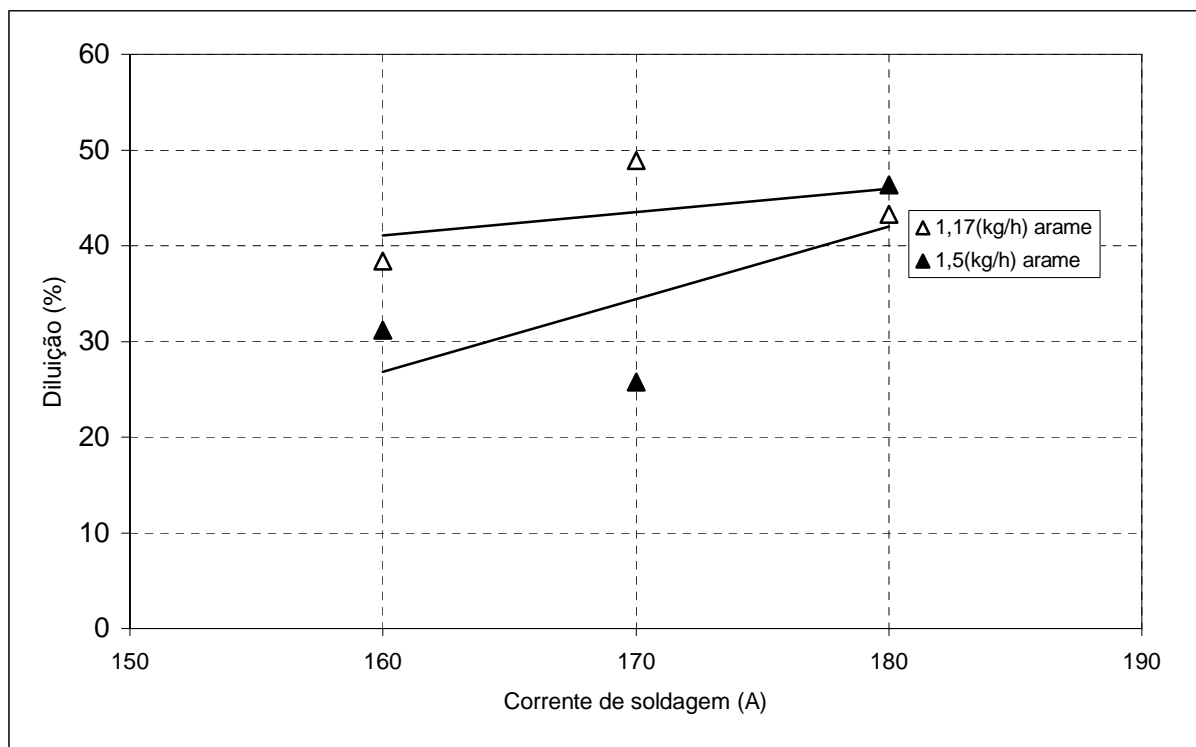


Figura 4.84 – Grau de diluição em função da corrente e taxa de alimentação – Processo PTAA

4.2.7 Análise da influência da corrente contínua pulsada

4.2.7.1 Introdução

O emprego da corrente contínua pulsada baseou-se nos estudos de vários autores, que relatam as vantagens da aplicação deste tipo de corrente utilizando-se como material de aporte arame (Kou, 1987; Lucas, 1982). A principal vantagem do ponto de vista metalúrgico está relacionado com o refino da estrutura de solidificação, o qual é atribuída à fragmentação das dendritas durante a solidificação, devido à agitação da poça de fusão.

4.2.7.2 Procedimento experimental

Verificou-se o efeito da frequência de pulsação e o tipo de bico constritor sobre o grau de diluição, dureza, microestrutura, largura da solda, reforço, penetração, profundidade da ZAC e a resistência do revestimento ao desgaste por deslizamento, estes avaliados em teste de Pino sobre Disco conforme a norma ASTM G99-95. Para uma mesma corrente média, são comparadas soldagens realizadas com corrente contínua constante.

Realizaram-se testes sobre chapas de aço carbono da classe ABNT 1020. Essas foram cortadas nas dimensões de 12,5x60x155mm e esmerilhadas para a remoção da camada de óxido. Este estudo foi realizado a partir dos parâmetros de soldagem indicados na Tabela 4.16.

A influência da modulação de corrente de soldagem foi analisada submetendo as amostras a ensaios de resistência ao desgaste por deslizamento, estes avaliados em teste de Pino sobre Disco. Inicialmente foram realizados depósitos segundo as seguintes condições de soldagem:

- i. Corrente contínua constante
- ii. Corrente contínua pulsada ($f=5$ Hz)

Tabela 4.16 – Variáveis e parâmetros de soldagem-Corrente contínua pulsada

Variáveis		
Corrente média de soldagem	$I_m(A)$	160
Corrente de pulso	$I_p(A)$	200
Corrente de base	$I_b(A)$	120
Tempo de pulso	$t_p(s)$	0,1; 0,2
Tempo de base	$t_b(s)$	0,1; 0,2
Velocidade de soldagem	$V_s(cm/min)$	16
Gás de plasma	$V_{GP}(l/min)$	2,4
Gás de proteção	$G_{Pr}(l/min)$	10
Gás de arraste	$G_{Tr}(l/min)$	2
Taxa de alimentação	$T_x(kg/h)$	1,4
Diâmetro do bico constritor/ângulo de convergência	$d(mm)/(^\circ)$	4,8/30-4,8/60
Distância bico-peça	$DBP(mm)$	10
Recuo	$R_c(mm)$	2,4

Por cada condição de soldagem foram realizados três depósitos, totalizando 6 corpos de prova. Por cada corpo de prova foram tirados 15 pinos e pesados em balança de precisão de 0,1 mg antes e depois do ensaio de desgaste.

Os ensaios foram realizados com carga de 1, 2, 3 e 4 kg, com uma velocidade tangencial constante e igual a 2 m/s, pelo tempo de 16,6 min, totalizando uma distância do ensaio de 2000 m.

A taxa de desgaste versus a carga aplicada, foi levantada testando três pinos para cada carga ensaiada, totalizando 12 pinos para cada curva de desgaste.

4.2.7.3 Análises dos resultados

Foram conduzidos alguns ensaios para conferir o efeito da frequência de pulsação, fazendo testes com 5 e 2,5 Hz, utilizando-se dois tipos de bicos constritores: B-30 e B-60.

Foram comparados os depósitos realizados com corrente contínua constante e pulsada, usando a mesma corrente média de 160 A. Para que isto fosse conseguido, os depósitos em corrente pulsada foram realizados com uma relação de $\frac{I_p}{I_b} = \frac{200}{120}$

Considerando que $\frac{tp}{tb} = 1$

A Figura 4.85 mostra o aspecto externo dos depósitos. As Figuras 4.86 e 4.87 mostram a seção transversal dos depósitos obtidos para dois tipos de bicos constritores, para duas frequências e comparados os resultados em corrente contínua constante.

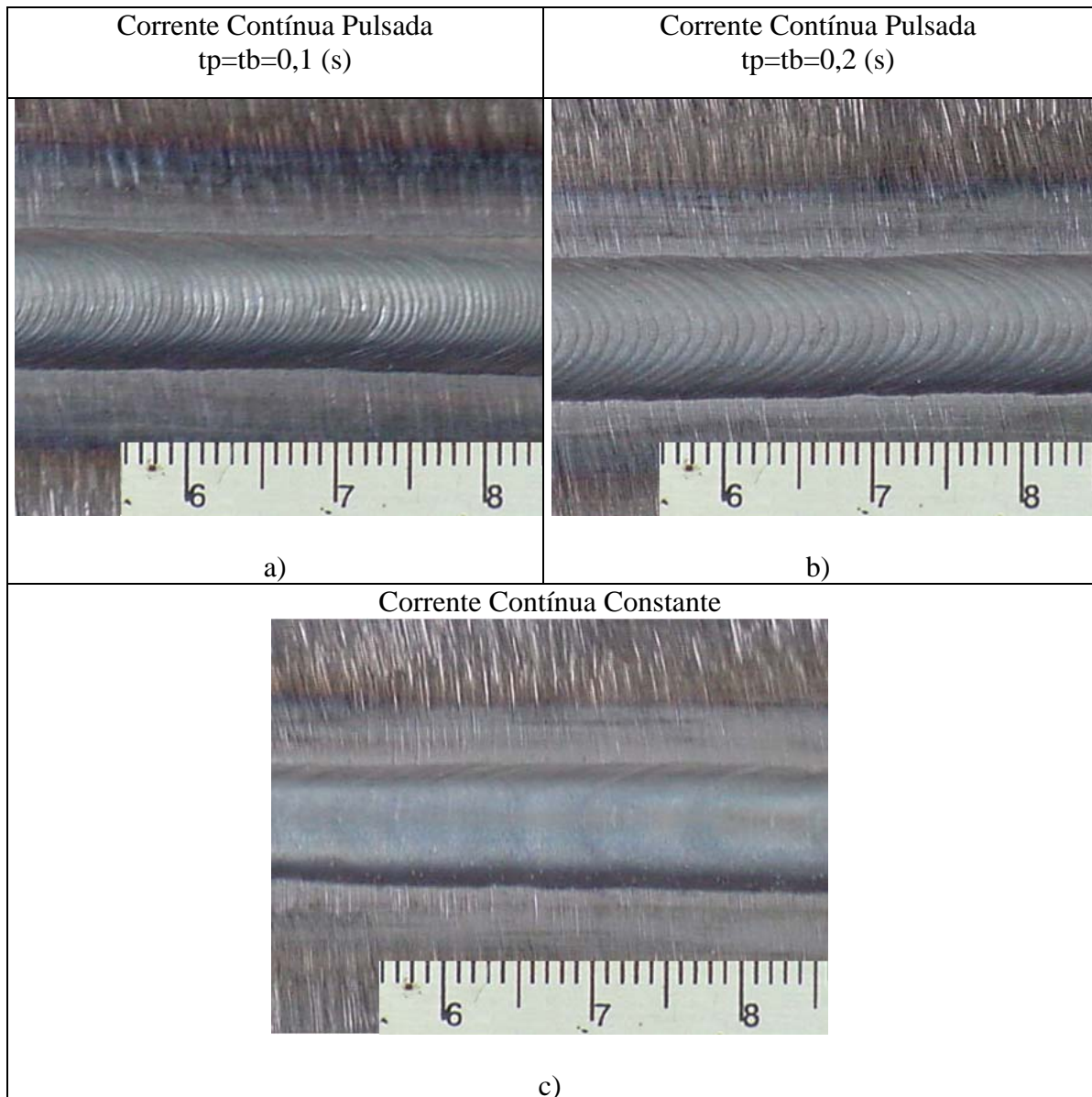
Como pode ser observado na Figura 4.88, depósitos realizados com um bico constritor de 30° apresentaram maior largura, maior penetração e menor reforço em relação ao bico constritor de 60°, para uma mesma corrente média. Na Figura pode ser observado que a profundidade da ZAC se apresenta maior quando é empregado o bico constritor de 30°.

O gráfico da Figura 4.89 mostra o efeito da modulação da corrente, frequência de pulsação e tipo de bico constritor sobre o grau de diluição. Observe-se que os menores valores de diluição são obtidos para um bico constritor de 60°, com modulação de corrente pulsada e com uma frequência de pulsação de 2,5 Hz.

As Figuras 4.90, 4.91 e 4.92 apresentam as microestruturas observadas na região da superfície, centro e interface para depósitos realizados com um bico constritor de 30°, para duas frequências de pulsação e comparadas com corrente contínua constante.

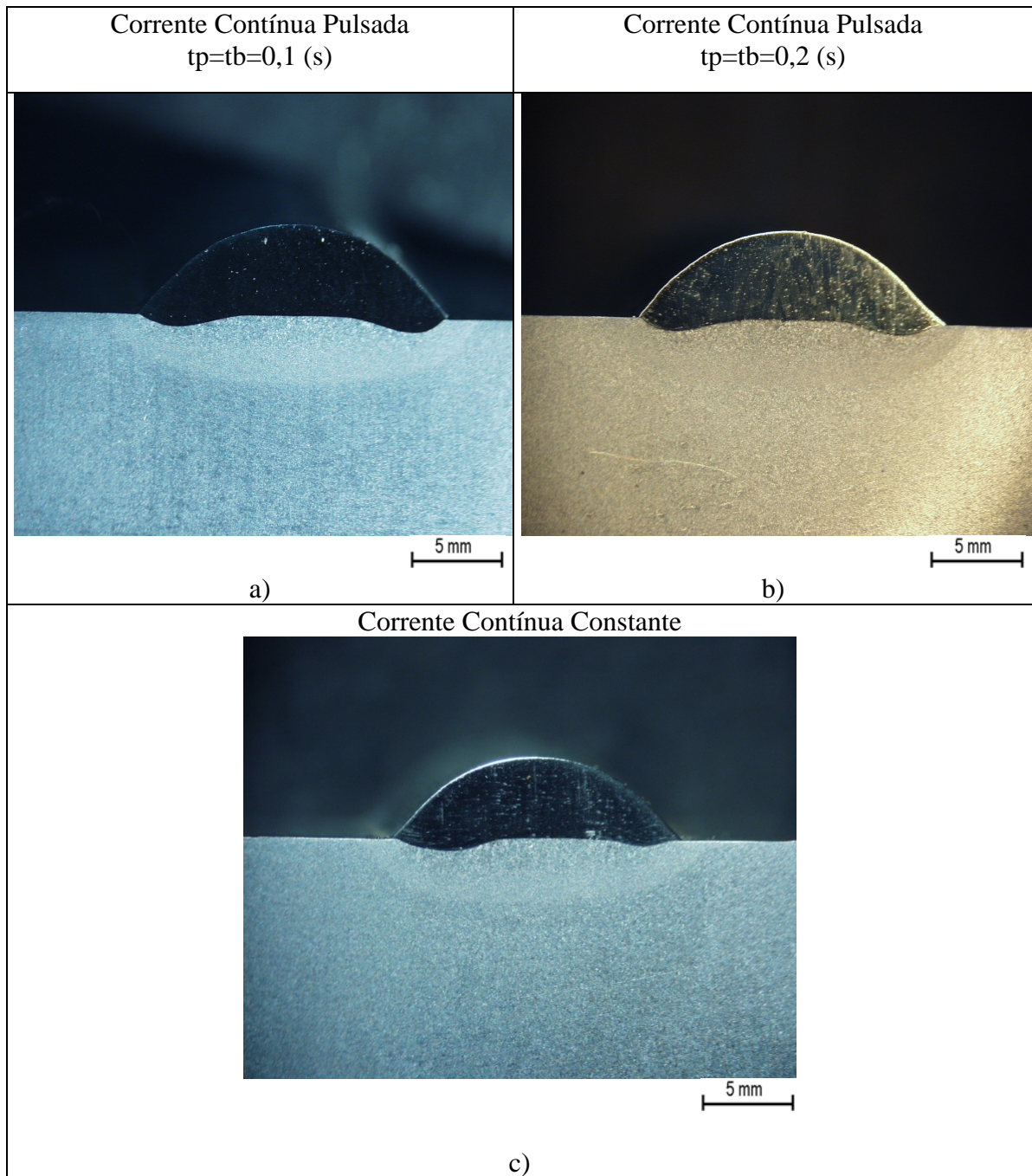
As Figuras 4.93, 4.94 e 4.95 apresentam as microestruturas observadas na região da superfície, centro e interface para depósitos realizados com um bico constritor de 60°, para duas frequências de pulsação e comparadas com corrente contínua constante.

Como pode-se observar na Figura 4.96, a análise da microestrutura no centro do depósito, para os dois tipos de bicos constritores, mostra que apesar de ter ocorrido o refinamento com corrente contínua pulsada, o mesmo foi mais tênue que com corrente contínua constante.



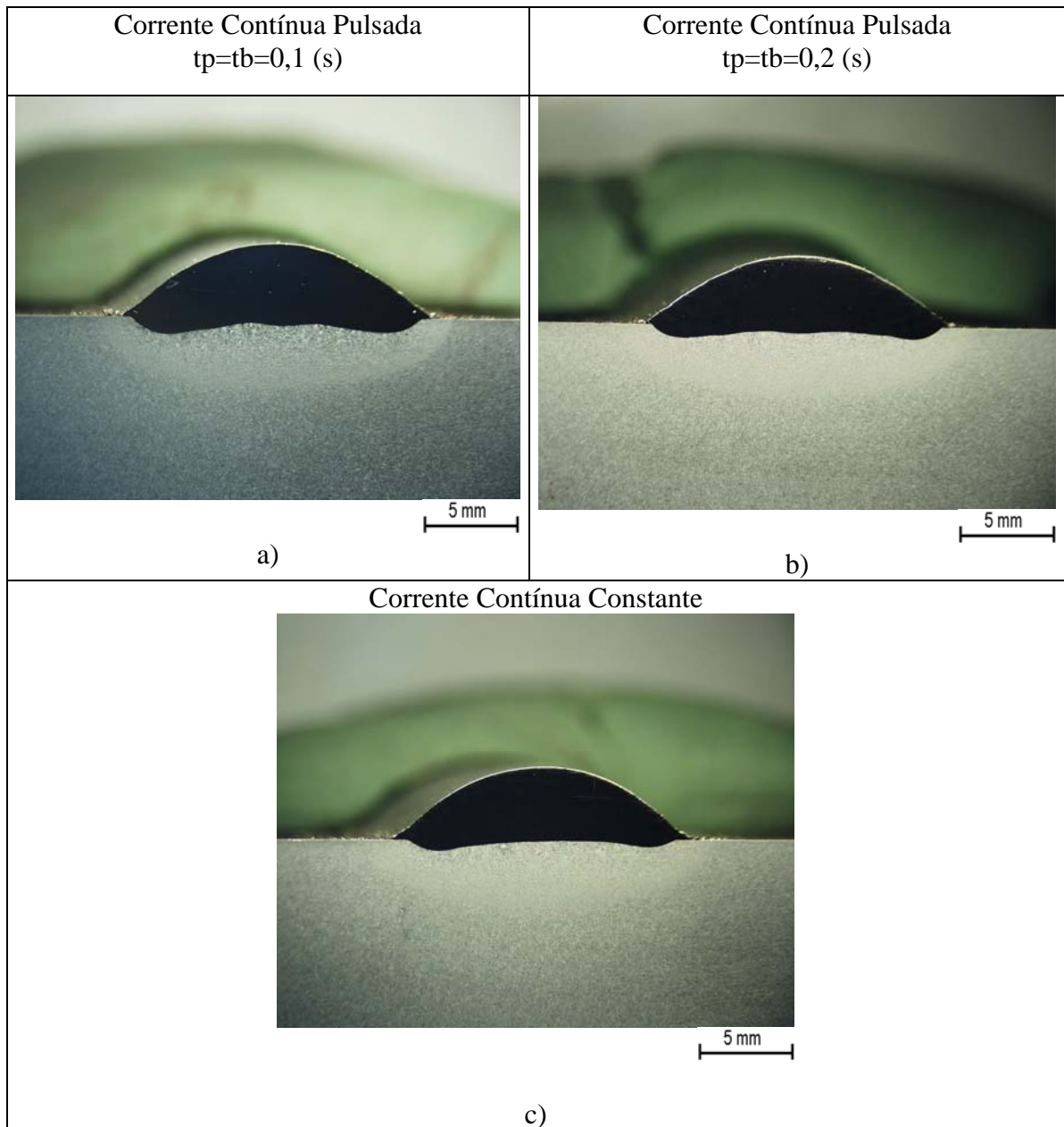
a) $f=5$ Hz; b) $f=2,5$ Hz; c) Corrente contínua constante

Figura 4.85 – Aspecto superficial dos depósitos de Stellite 6. Bico 60



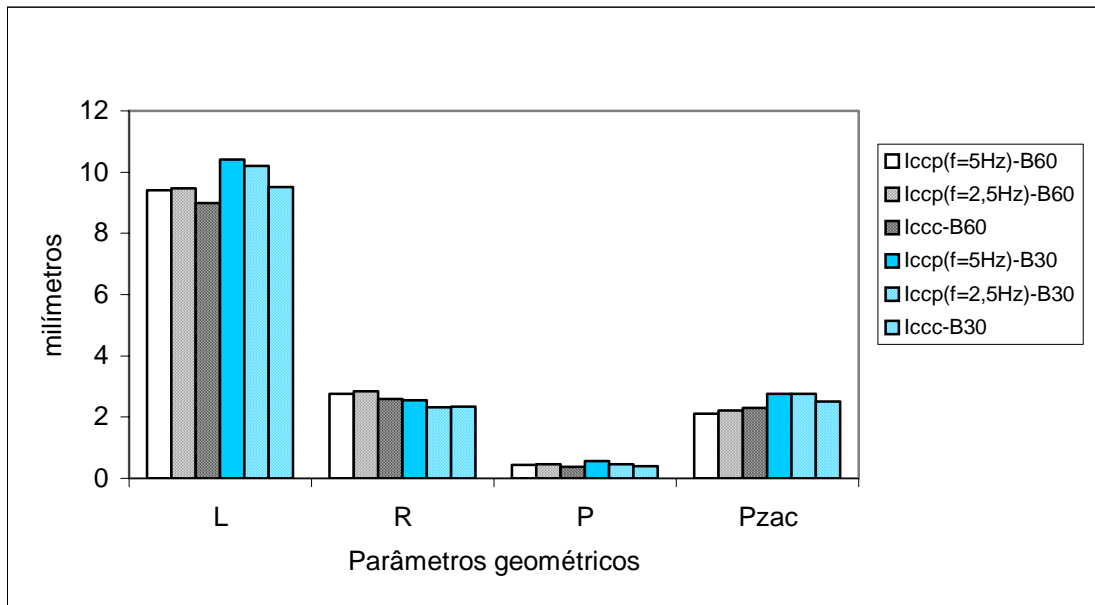
a) $f=5$ Hz; b) $f=2,5$ Hz; c) Corrente contínua constante

Figura 4.86 – Seção transversal dos cordões. Bico 60.



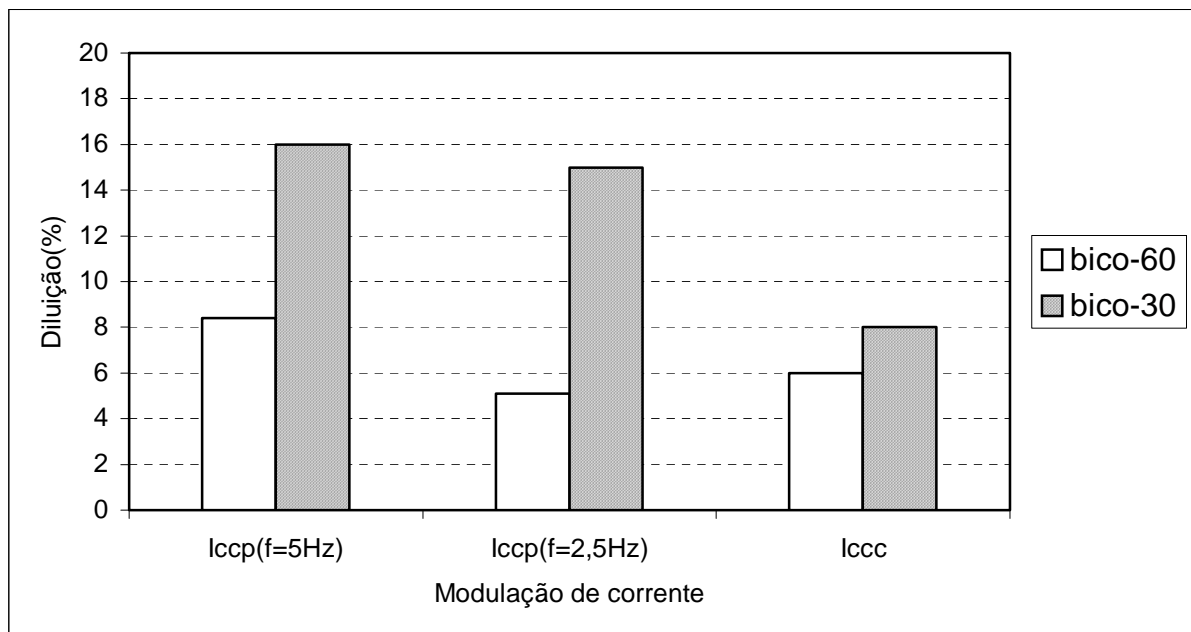
a) $f=5$ Hz; b) $f=2,5$ Hz; c) Corrente contínua constante

Figura 4.87 – Seção transversal dos cordões. Bico 30.



L: largura; R: Reforço; P: Penetração; Pzac: Profundidade da ZAC

Figura 4.88 – Condições geométricas dos depósitos em função da modulação de corrente e tipo de bico constritor



lccp: Corrente contínua pulsada; lccc: Corrente contínua constante; f: Frequência de pulsação da corrente de soldagem

Figura 4.89 – Grau de diluição em função da modulação de corrente e tipo de bico constritor

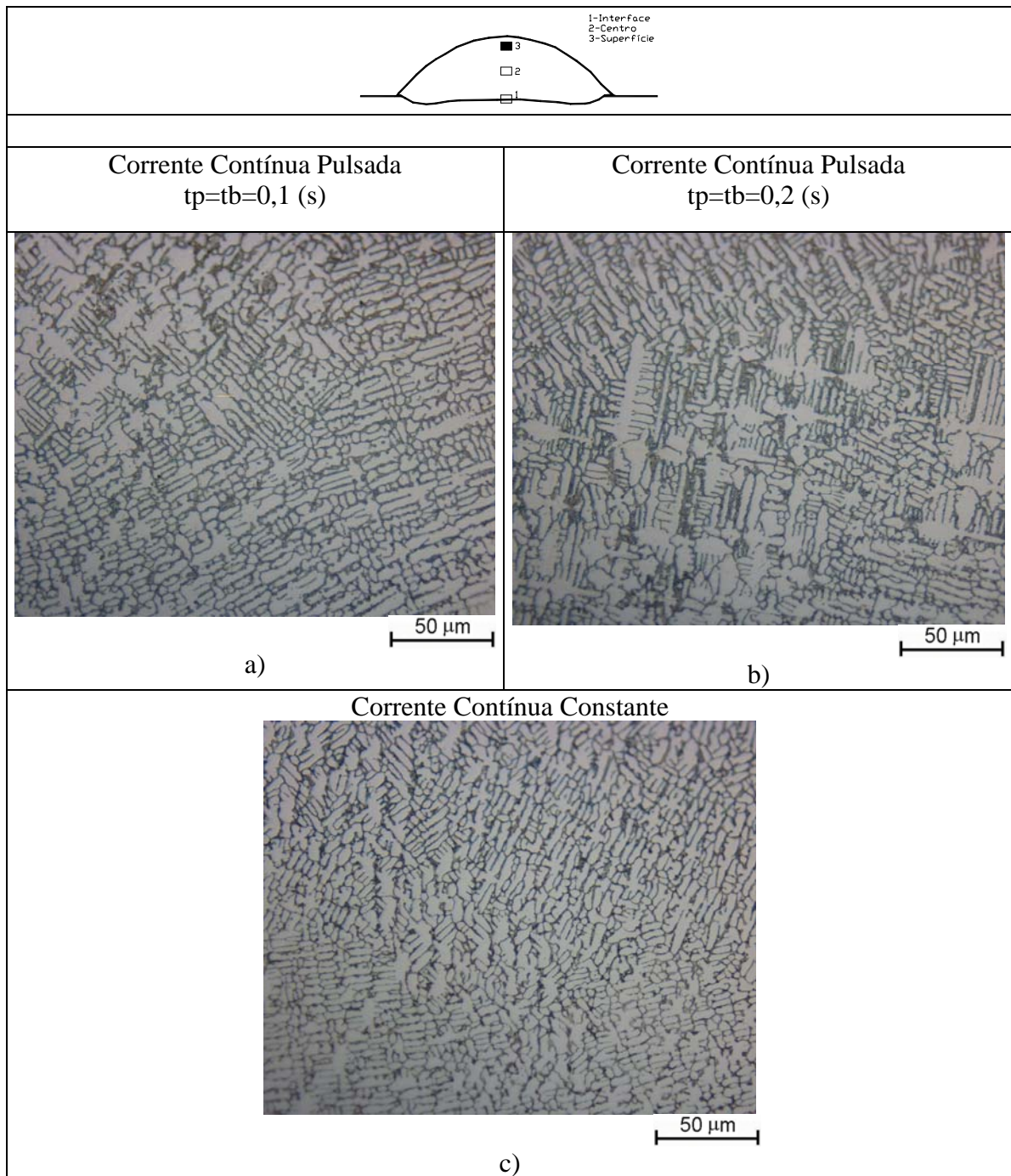


Figura 4.90 – Micrografias das amostras de Stellite 6 junto à superfície. Bico 30.

- a) Corrente contínua pulsada $f=5$ Hz; b) Corrente contínua pulsada $f=2,5$ Hz; c) Corrente contínua constante

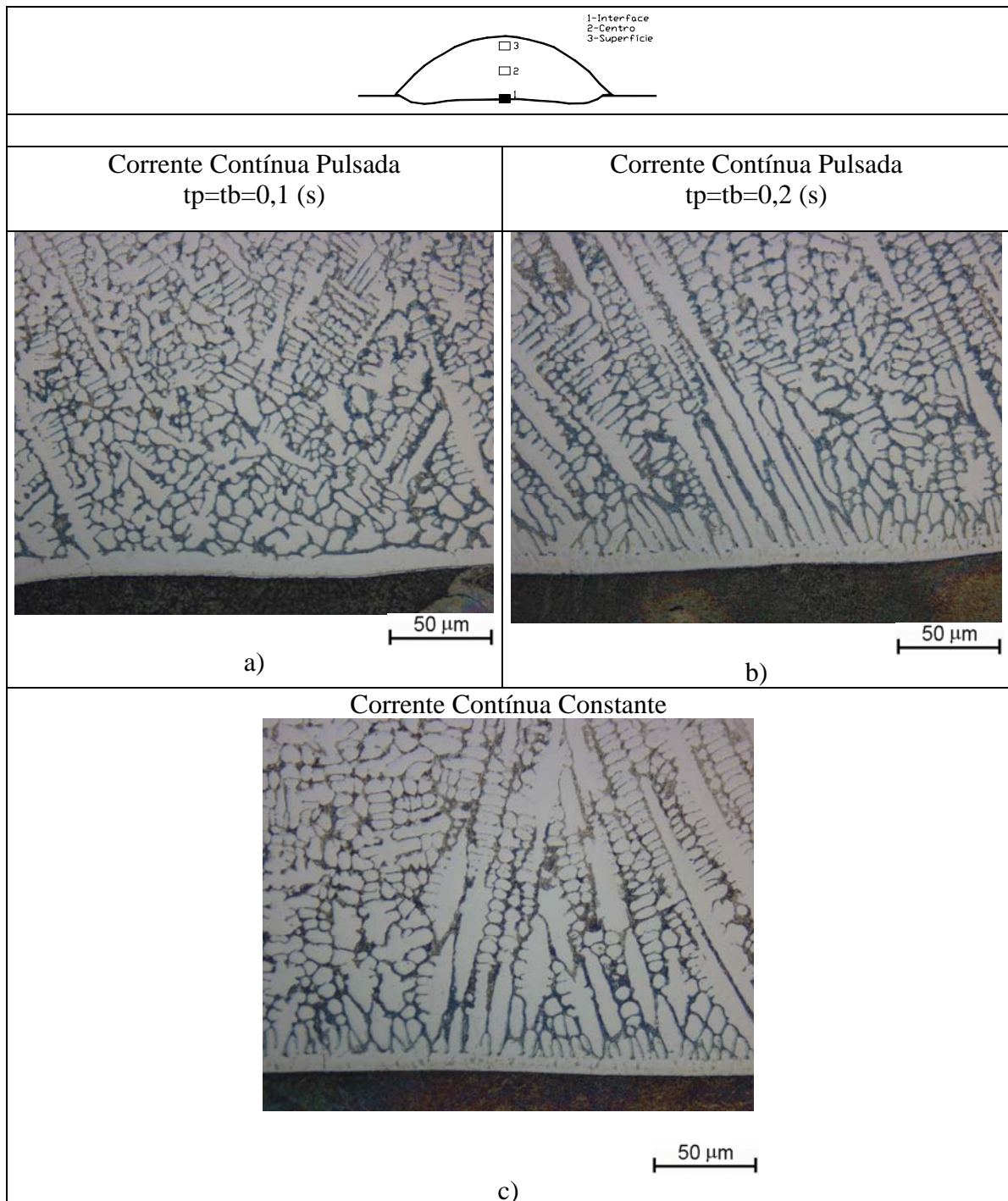


Figura 4.91 – Micrografias da região de ligação substrato-depósito. Bico 30.

a) Corrente contínua pulsada $f=5$ Hz; b) Corrente contínua pulsada $f=2,5$ Hz; c) Corrente contínua constante

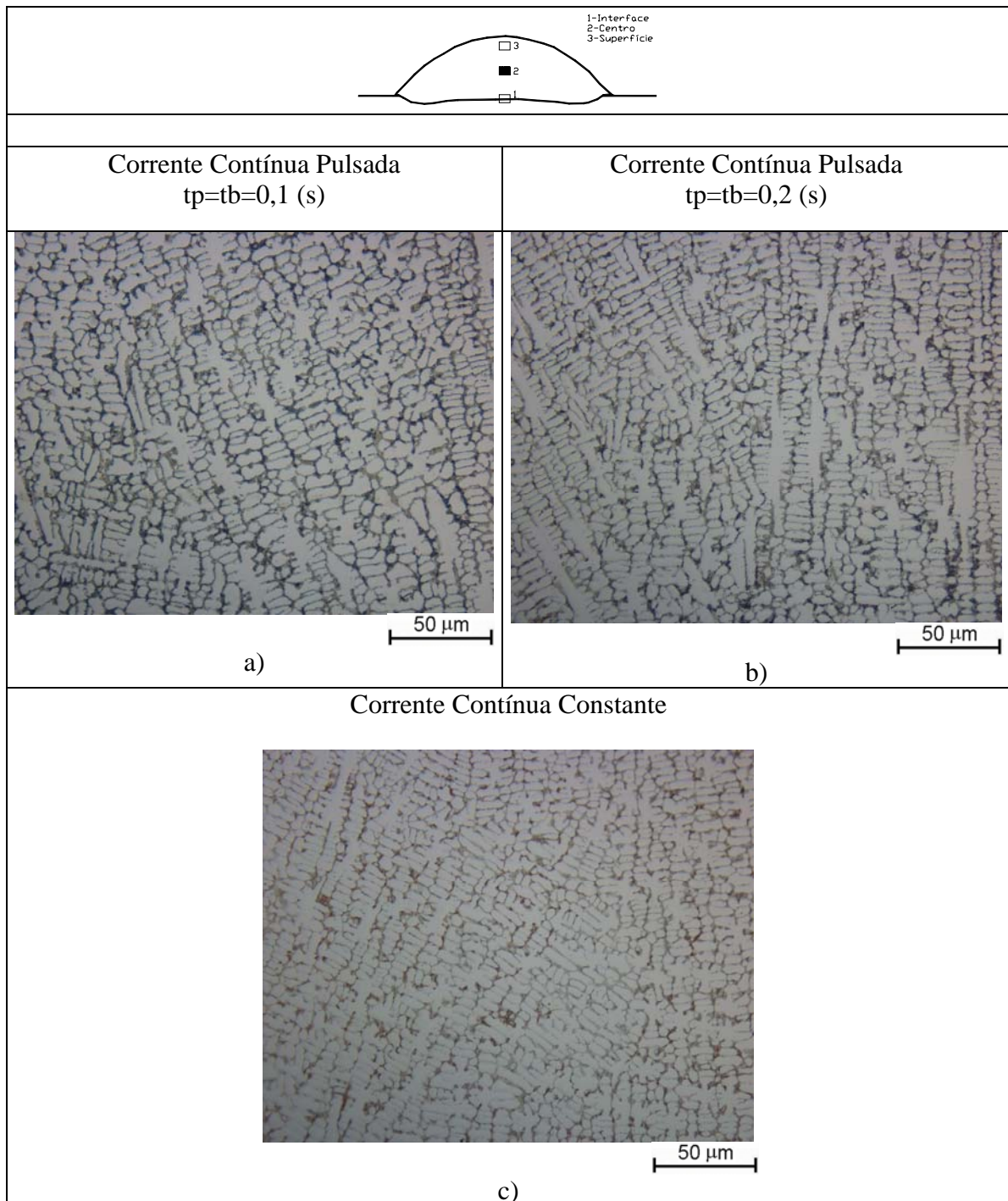


Figura 4.92 – Micrografias da região do centro do depósito. Bico 30.
 a) Corrente contínua pulsada $f=5$ Hz; b) Corrente contínua pulsada $f=2,5$ Hz; c) Corrente contínua constante

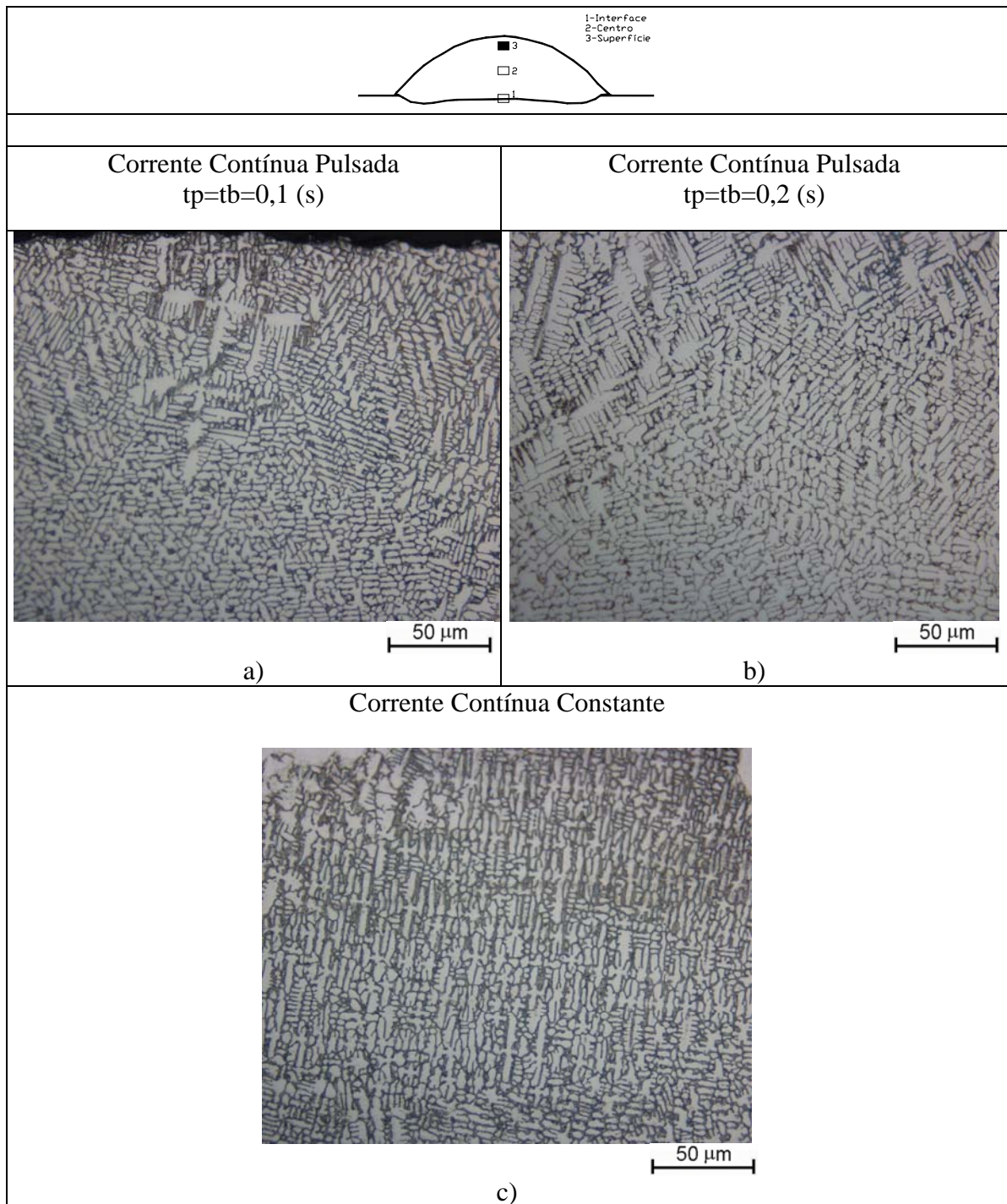


Figura 4.93 – Micrografias das amostras de Stellite 6 junto à superfície. Bico 60.

b) Corrente contínua pulsada $f=5$ Hz; b) Corrente contínua pulsada $f=2,5$ Hz; c) Corrente contínua constante

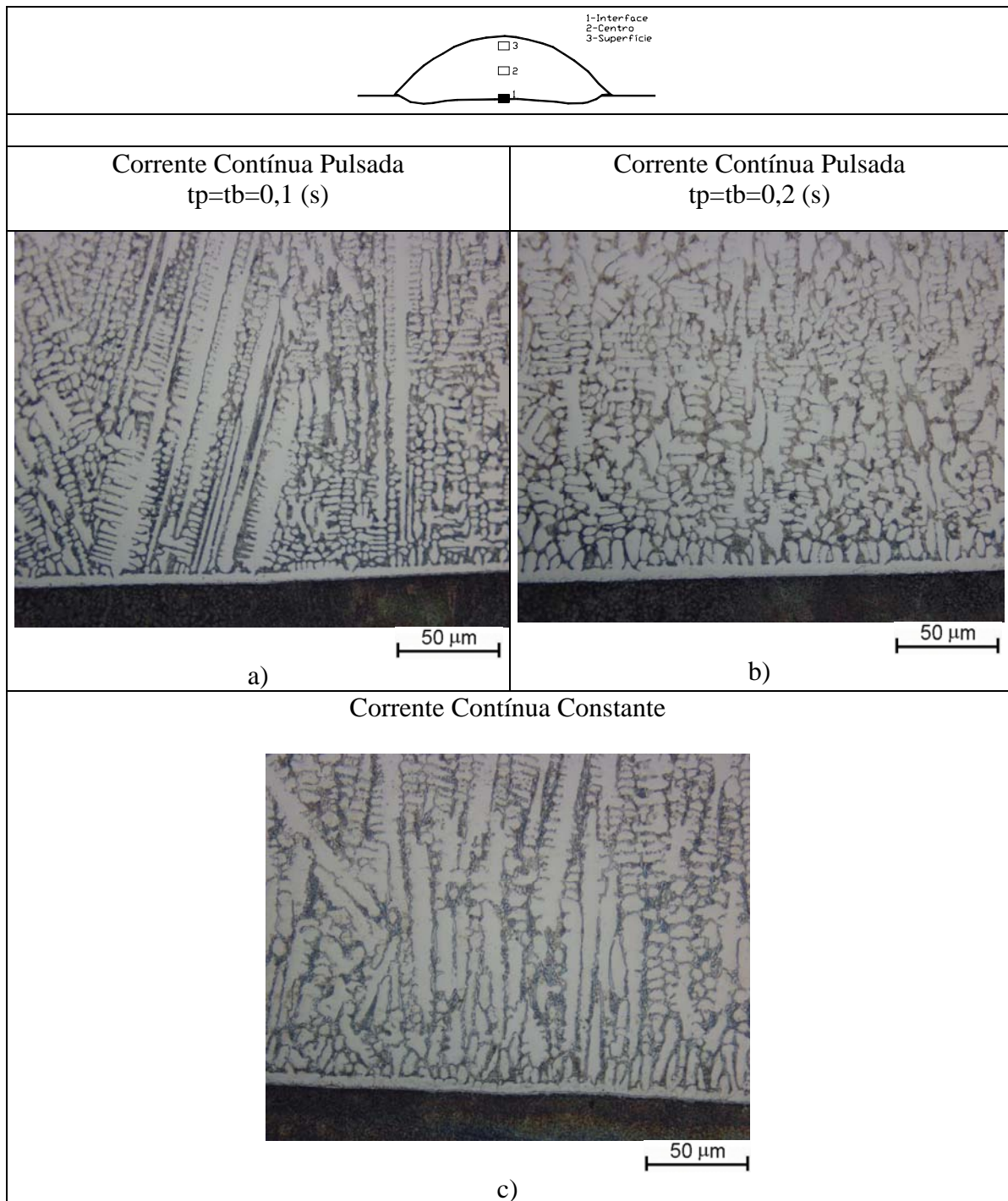


Figura 4.94 – Micrografias da região de ligação substrato-depósito. Bico 60.

a) Corrente contínua pulsada $f=5$ Hz; b) Corrente contínua pulsada $f=2,5$ Hz; c) Corrente contínua constante

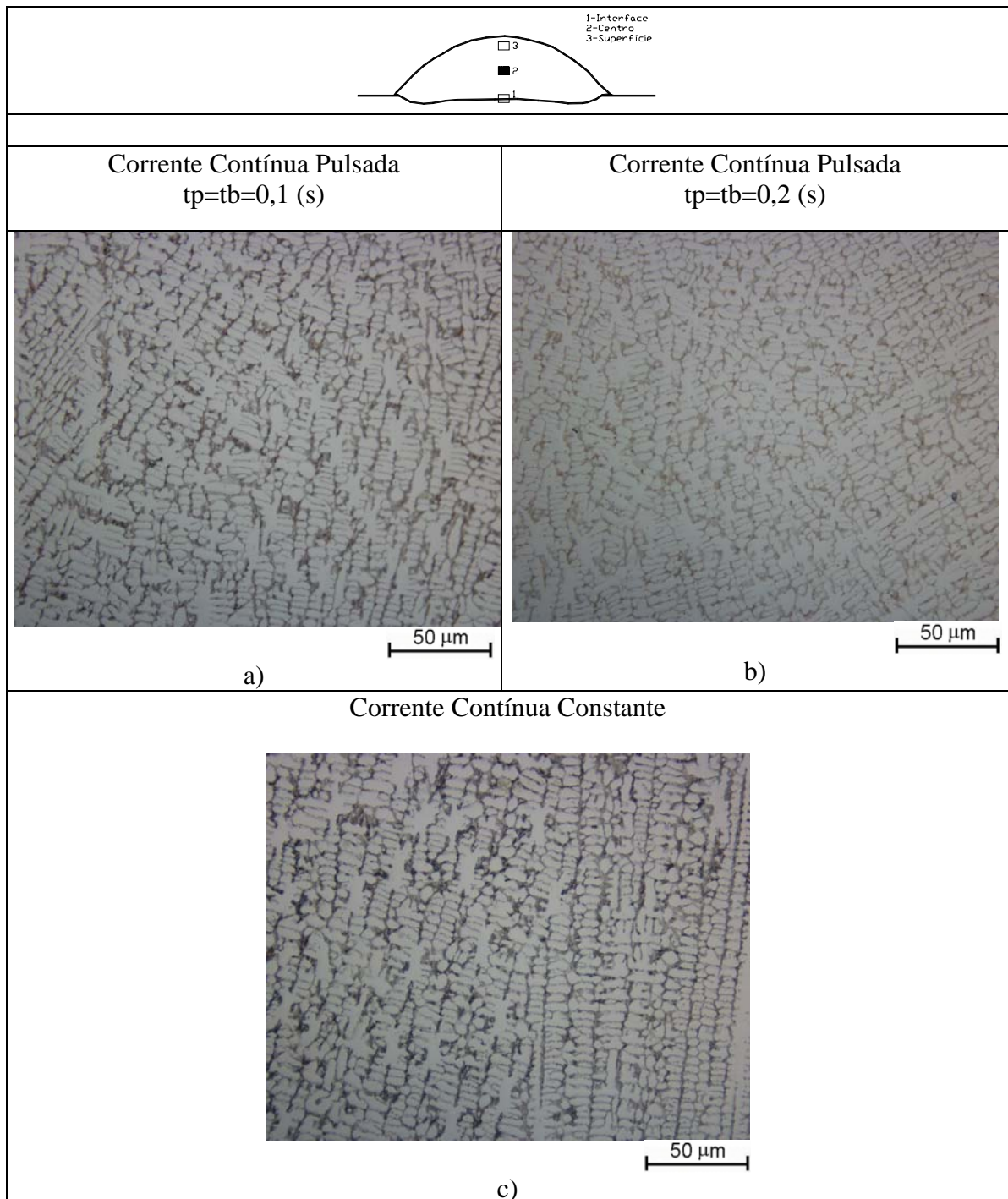


Figura 4.95 – Micrografias da região do centro do depósito. Bico 60.

a) Corrente contínua pulsada $f=5$ Hz; b) Corrente contínua pulsada $f=2,5$ Hz; c) Corrente contínua constante

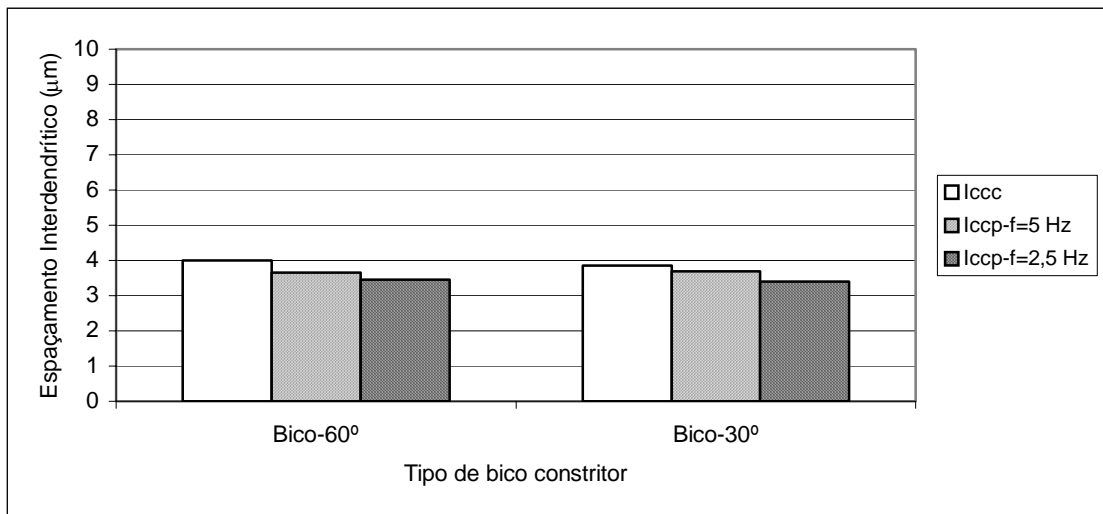


Figura 4.96 – Espaçamento dos braços dendríticos no centro do cordão de solda. Comparação entre corrente contínua constante e corrente contínua pulsada utilizando dois tipos de bicos constritores.

As Figuras 4.97 e 4.98 mostram as durezas em função do tipo de bico constritor e a modulação da corrente de soldagem. Analisando a dureza obtida com o bico de constritor de 30° (Figura 4.97) os resultados mostram que o tipo de modulação de corrente não apresenta um efeito significativo sobre a dureza. A análise da Figura 4.98, que corresponde a depósitos conduzidos com um bico de 60°, mostra que o tipo de modulação de corrente não apresenta um efeito significativo sobre a dureza.

Percebe-se que o bico constritor de 30° apresentou os menores valores de dureza, associado aos maiores valores de penetração e conseqüentemente aos maiores valores de diluição, conseguidos através deste tipo de bico constritor.

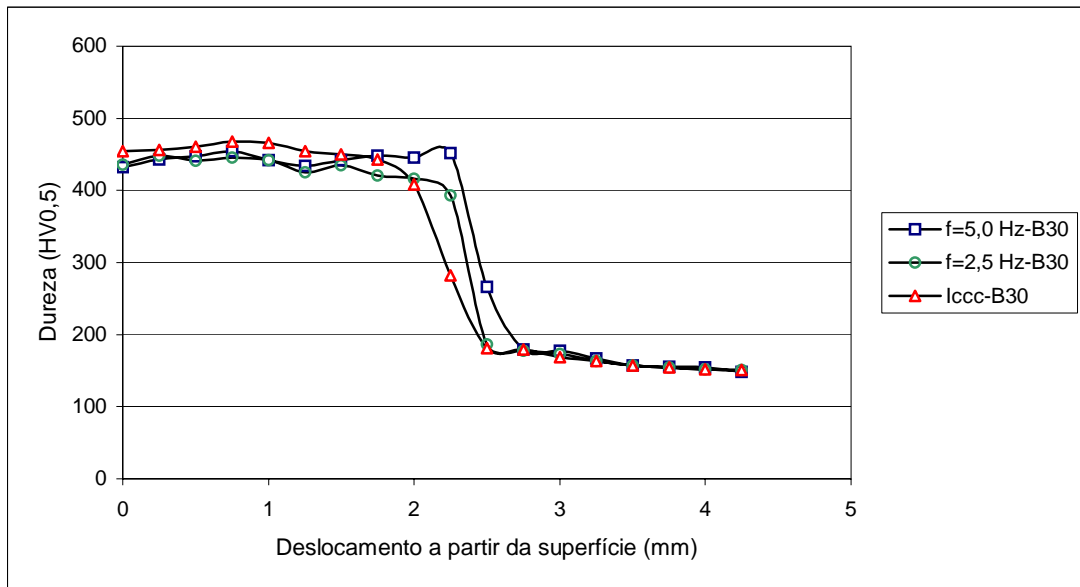


Figura 4.97 – Efeito do fator modulação de corrente sobre a dureza. Bico constritor de 30°

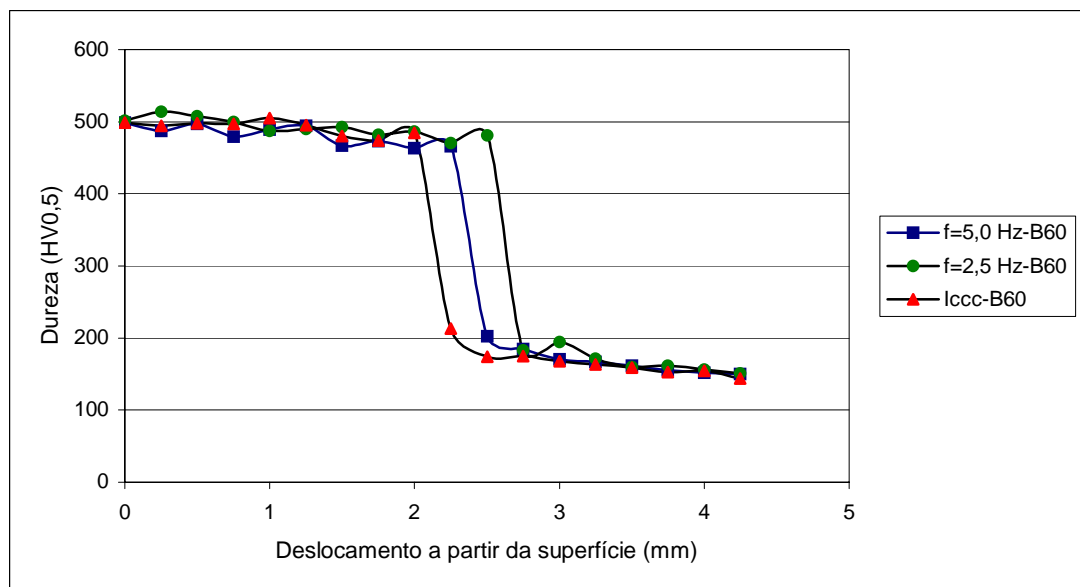
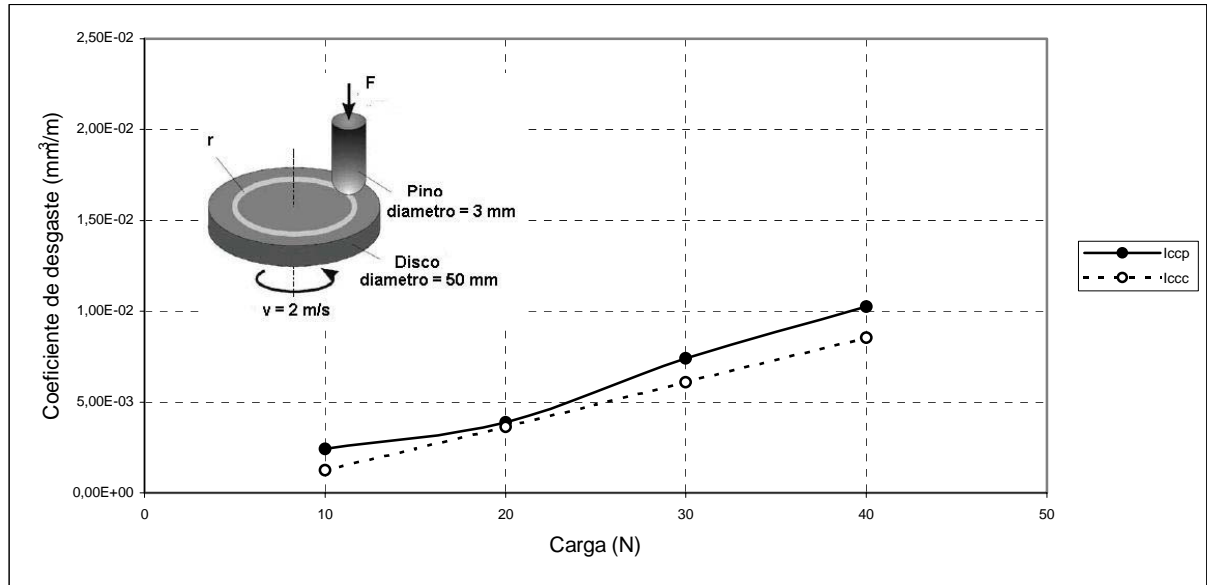


Figura 4.98 – Efeito do fator modulação de corrente sobre a dureza. Bico constritor de 60°

A influência da modulação de corrente de soldagem foi qualificada submetendo as amostras a ensaios de resistência ao desgaste por deslizamento, estes avaliados em teste de Pino sobre Disco. A Figura 4.99 relaciona a taxa de desgaste (mm^3/m) em função da carga aplicada e, conforme esperado (Santos, 2003), para todos os ensaios, a taxa de desgaste aumentou quando a carga aplicada foi aumentada. Observa-se que não houve uma diferença significativa na taxa de desgaste para revestimentos processados com corrente contínua constante e corrente contínua pulsada.



I_{ccc} : Corrente contínua constante; I_{ccp} : Corrente contínua pulsada

Figura 4.99 – Relação da taxa de desgaste (mm³/m) em função da carga aplicada

4.2.8 Análise da influência da técnica da oscilação da tocha (tecimento) sobre as características do depósito

4.2.8.1 Introdução

O emprego do tecimento mecânico na produção de depósitos baseou-se nos relatos de vários autores, que indicam as vantagens da aplicação deste tipo de ferramenta em relação à soldagem sem tecimento (Kou, 1987; Hidaka *et al* 1993, Barra 1998). A principal vantagem do ponto de vista de processo está relacionado com a largura do cordão, na qual, para este trabalho específico, foram conseguidos valores entre 15 a 20 mm, valores superiores aos conseguidos sem tecimento que são da ordem de 10 mm. Por outro lado, as vantagens do ponto de vista metalúrgico estão referidas aos menores valores do grau de diluição que pode ser conseguido quando é empregada a técnica do tecimento. Foram conduzidos alguns ensaios para avaliar o desempenho do processo utilizando-se a técnica da oscilação da tocha (tecimento).

4.2.8.2 Procedimento experimental

Na avaliação da influência do tecimento, foi utilizado um equipamento específico, desenvolvido no LABSOLDA denominado de TARTILOPE V2. A influência do tecimento foi avaliada a partir dos valores de diluição, largura da solda, reforço, penetração, profundidade da ZAC, dureza e microestrutura, medidos em depósitos realizados com os parâmetros indicados na Tabela 4.17. Foram testados dois tipos de bicos constritores, 30 e 60°.

Tabela 4.17 – Variáveis e parâmetros de soldagem-Tecimento

Variáveis		
Corrente de soldagem	I(A)	160
Velocidade de soldagem	Vs(cm/min)	7
Gás de plasma	VGP(l/min)	2,4
Gás de proteção	GPr(l/min)	10
Gás de arraste	GTr(l/min)	2
Taxa de alimentação	Tx(kg/h)	1,4
Diâmetro do bico constritor/ângulo de convergência	d(mm)/(°)	4,8/30; 4,8/60
Distância bico-peça	DTP(mm)	10
Recuo	Rc(mm)	2,4
Amplitude de tecimento	At (mm)	7,5
Frequência de tecimento	F(Hz)	1,5

Tipo de tecimento: triangular

4.2.8.3 Análises dos resultados

As Figuras 4.100 e 4.101 mostram o aspecto externo dos depósitos. Verificou-se, por observação visual, a existência de pó sem fundir nas regiões laterais dos depósitos quando foi empregado o bico de 30°. Nos ensaios realizados com o bico de 60° tal efeito não foi observado. Resultados semelhantes foram encontrados no item **4.2.2.3.2 “Influência do ângulo de convergência do bico constritor”** onde se explica a origem do pó aderido nas laterais dos depósitos. Ensaios radiográficos mostraram cordões de solda isentos de porosidades e qualquer outro defeito (Figura 4.102), concluindo-se que o pó sem fundir aderido nas laterais do cordão, produzido pelo bico constritor de 30°, não constitui-se em uma descontinuidade, já que na radiografia não se observa nenhuma variação de densidade nesses locais.

A Figura 4.103 mostra a seção transversal dos depósitos obtidos para dois tipos de bicos constritores. Através da seção transversal dos depósitos é possível observar uma solda isenta de porosidades e sem falta de fusão nas laterais do cordão.

A análise da Figura 4.104, indica que, o bico constritor não afeta significativamente no reforço e penetração. Em relação à largura do cordão, para os dois tipos de bicos testados o valor foi de 15 mm, que corresponde à amplitude do tecimento programado no TARTILOPE V2. (Largura = 2*Amplitude).

O gráfico da Figura 4.105 mostra o efeito do bico constritor sobre o grau de diluição. Para o bico constritor de 30° o grau de diluição alcançado foi de 17,3 % e para o bico constritor de 60° o grau de diluição medido foi de 15,6 %.

A análise da Figura 4.106, indica que, de uma forma geral, o tipo de bico constritor não afeta significativamente sobre a dureza dos cordões quando é empregada a técnica de tecimento da tocha.

A Figura 4.107 apresenta as microestruturas na região da superfície, centro e interface dos depósitos, observando-se que não existe uma alteração considerável nas microestruturas obtidas através dos bicos constritores de 30° e 60°.

O emprego de tecimento, através da oscilação da tocha, resultou ser uma ferramenta que permitiu produzir cordões de qualidade. Neste caso, pode-se produzir uma diversidade de cordões com diferentes larguras quando é conseguida uma adequada combinação da amplitude de oscilação, frequência de oscilação, velocidade de soldagem e taxa de deposição. A título de exemplo, a Figura 4.108, mostra o aspecto superficial e a seção transversal de um cordão com uma largura de 20 mm, reforço de 2,3 mm e grau de diluição de 3,6%.

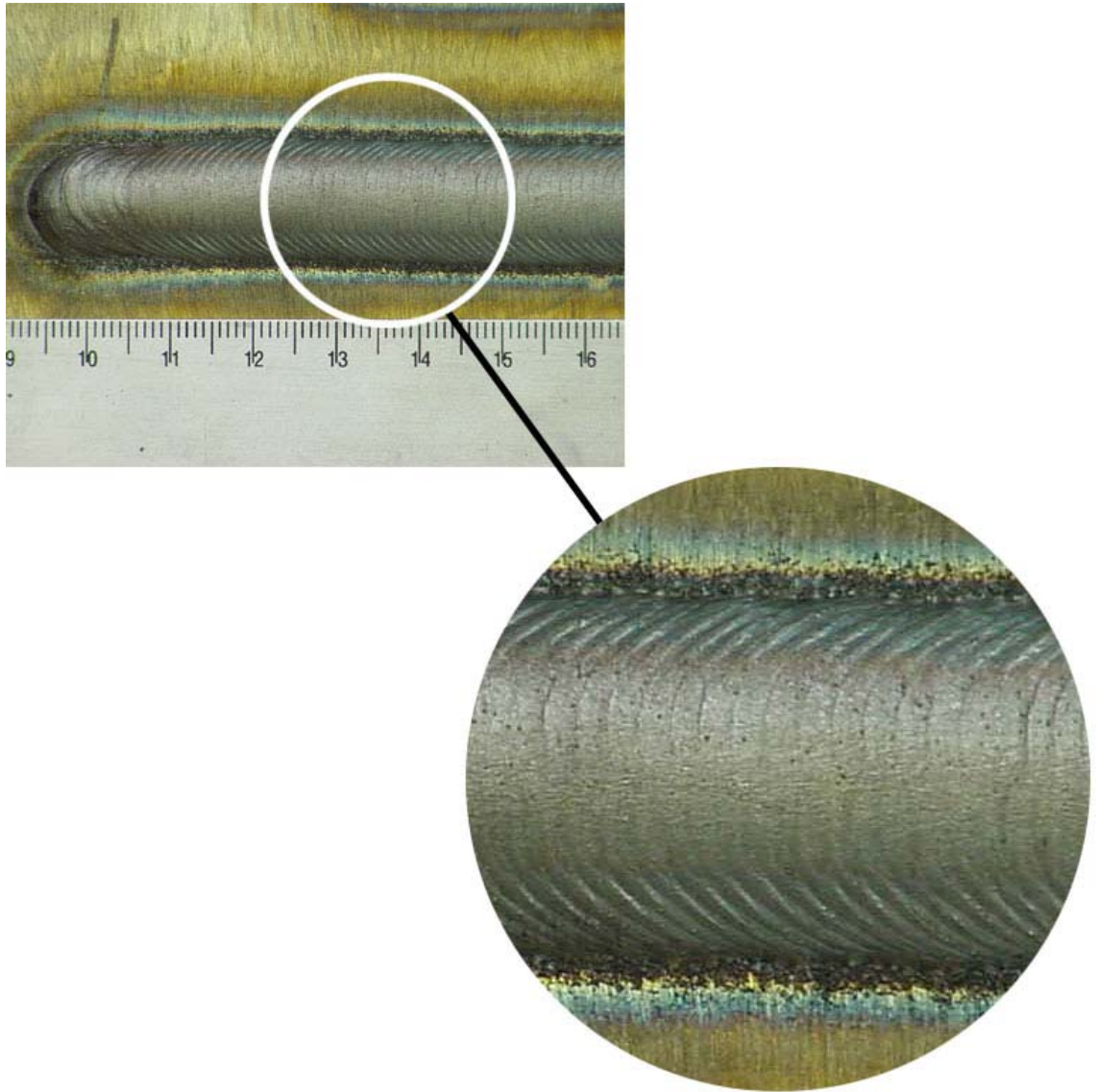


Figura 4.100 – Aspecto superficial do depósito de Stellite 6. Bico 30°.

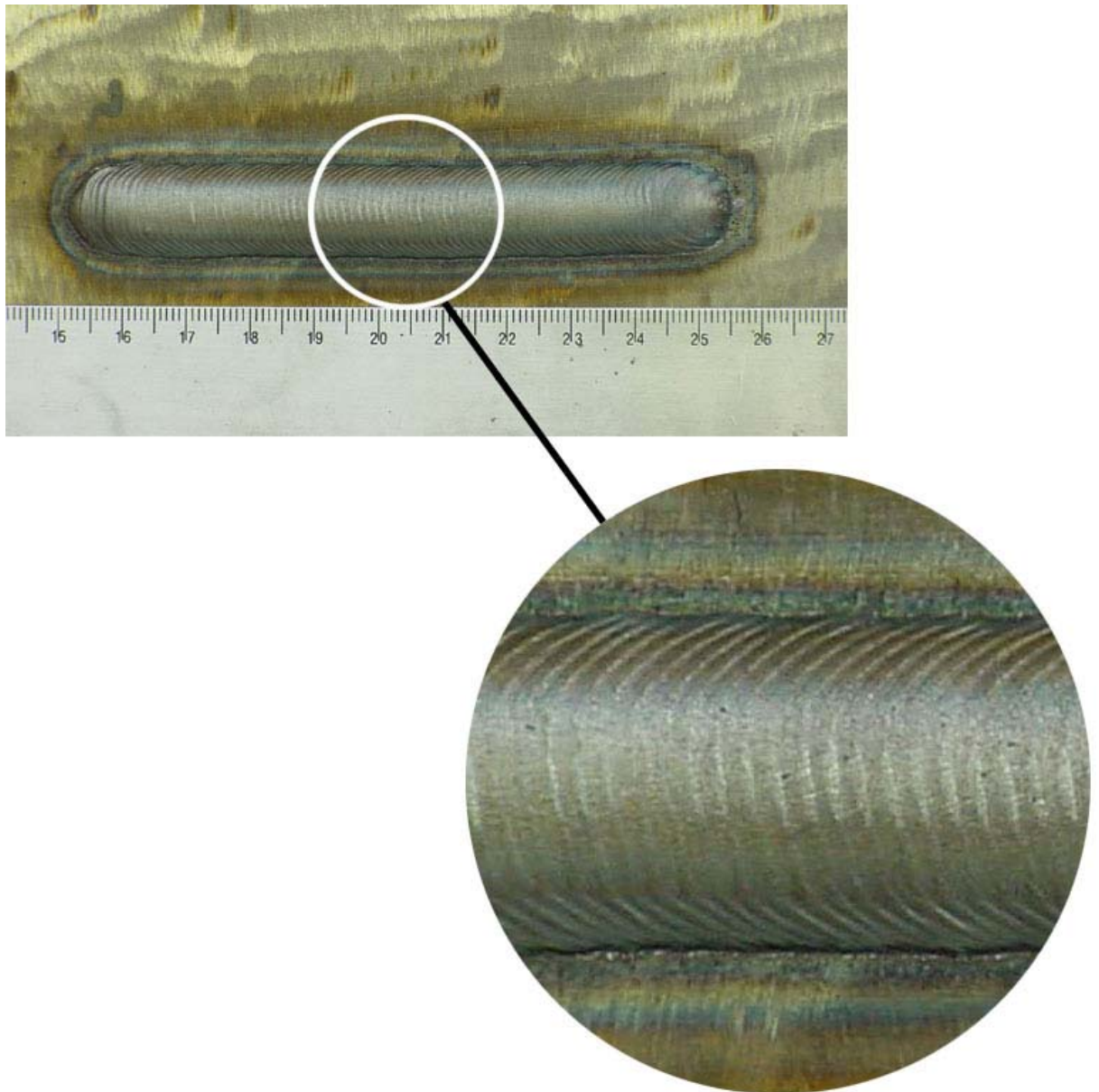


Figura 4.101 – Aspecto superficial do depósito de Stellite 6. Bico 60°.

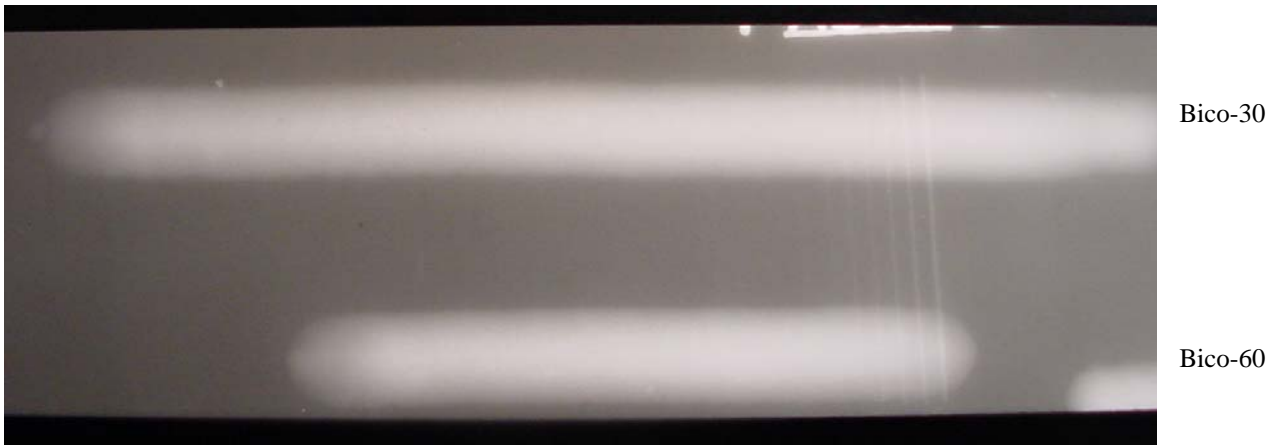
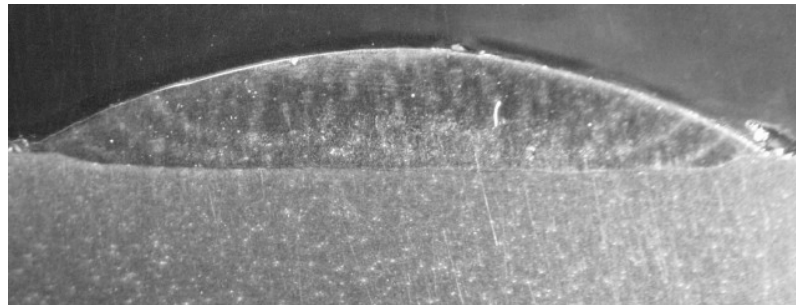
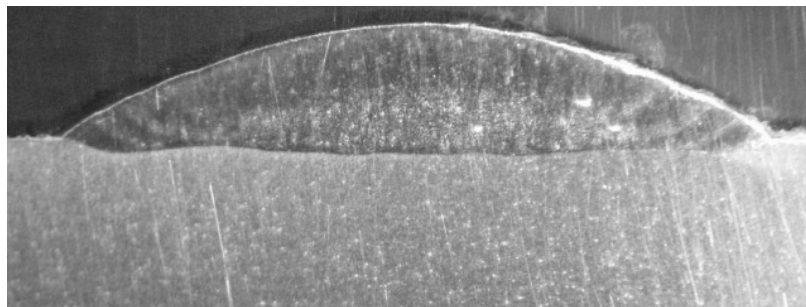


Figura 4.102 – Ensaio radiográfico



a) Bico constritor de 30°



b) Bico constritor de 60°

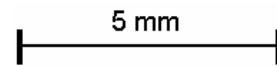
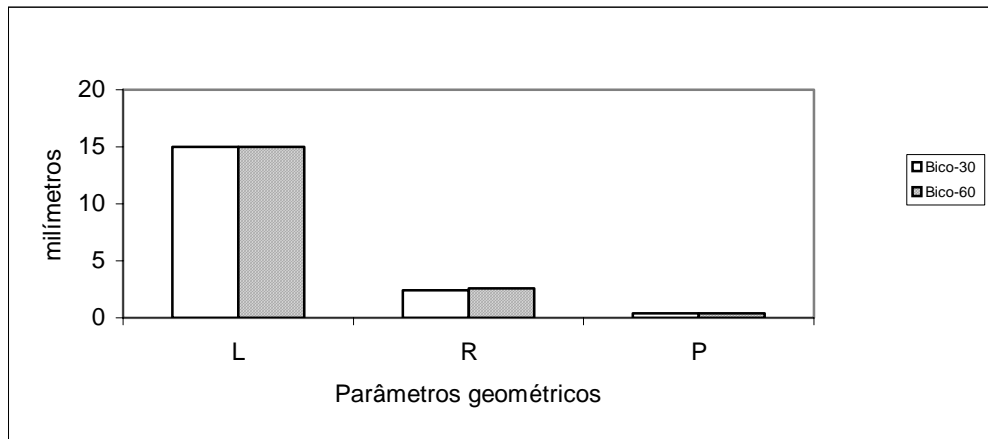


Figura 4.103 – Seção transversal dos cordões para bicos constritores de 30° e 60°



L: Largura; R: Reforço; P: Penetração

Figura 4.104 – Parâmetros geométricos

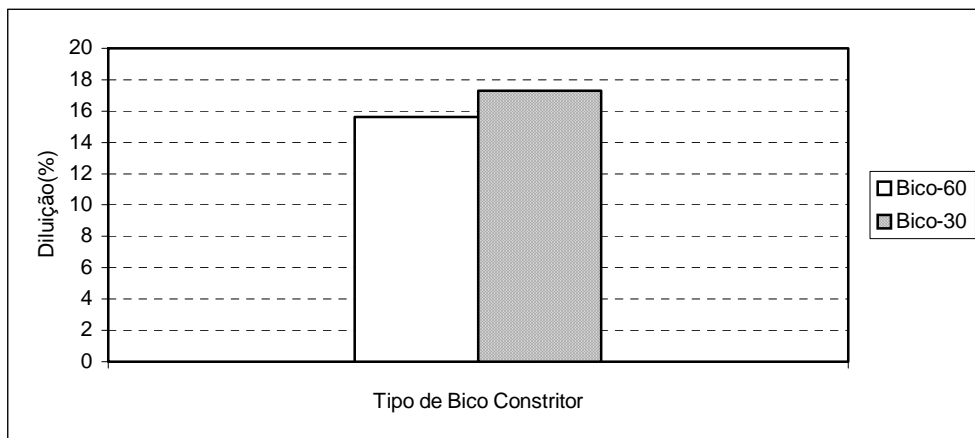


Figura 4.105 – Efeito do bico constritor sobre o grau de diluição

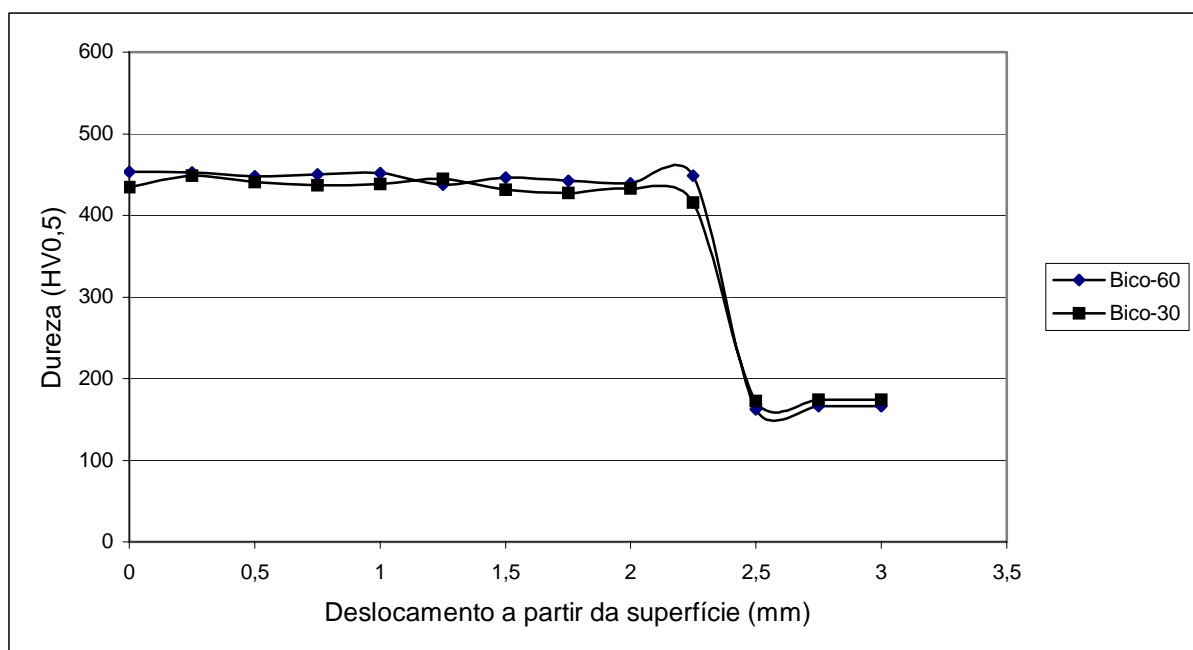


Figura 4.106 – Efeito do tipo de bico constritor sobre a dureza

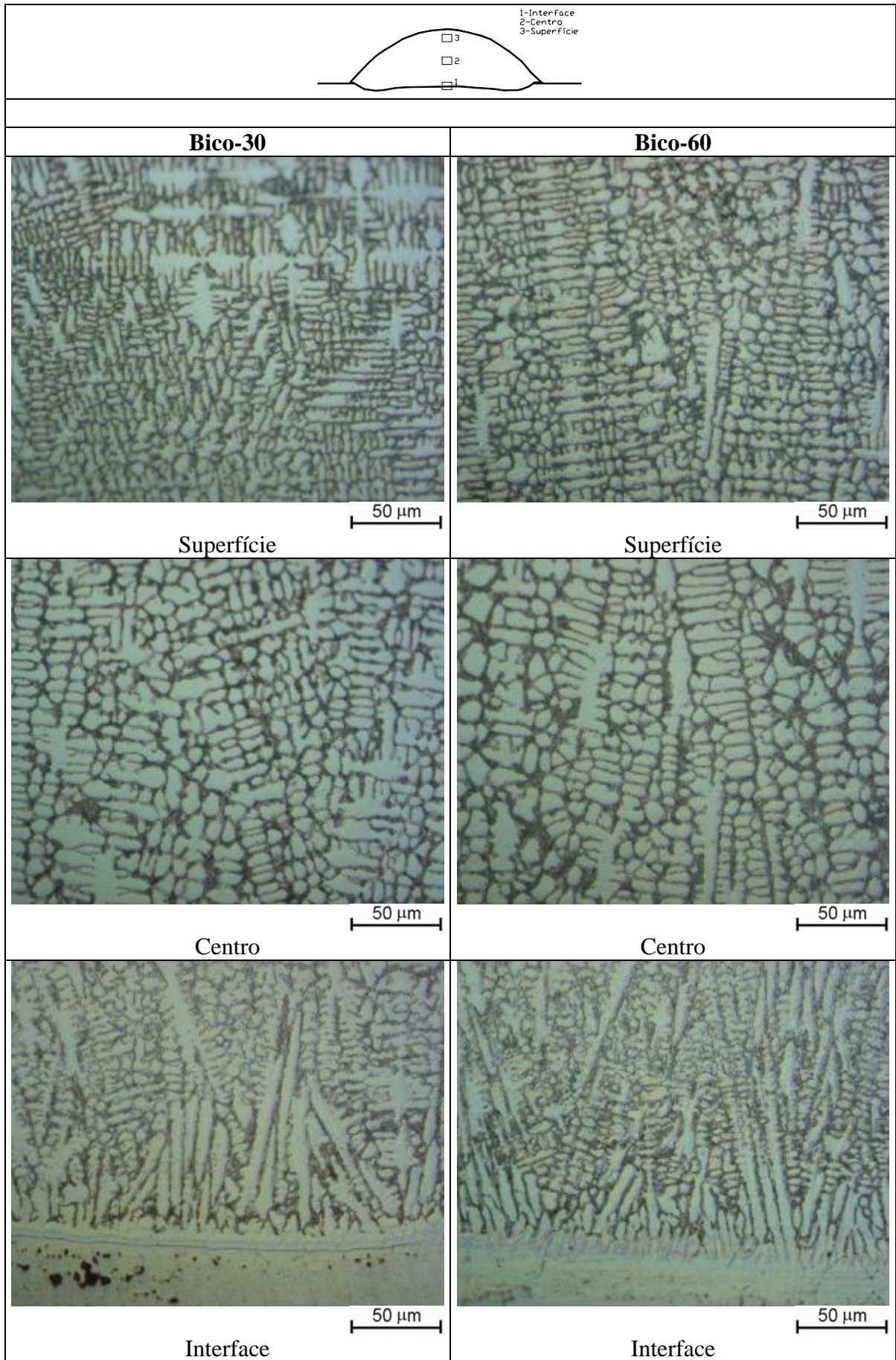
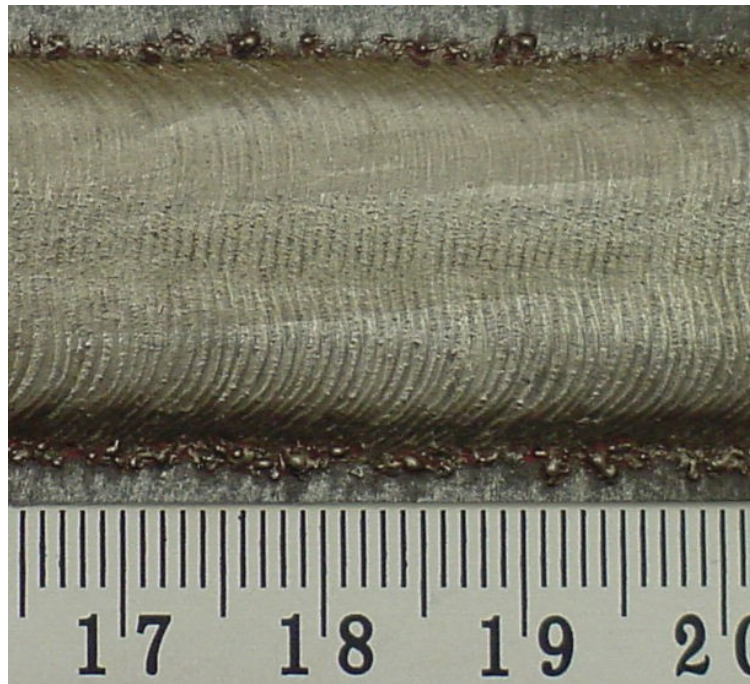
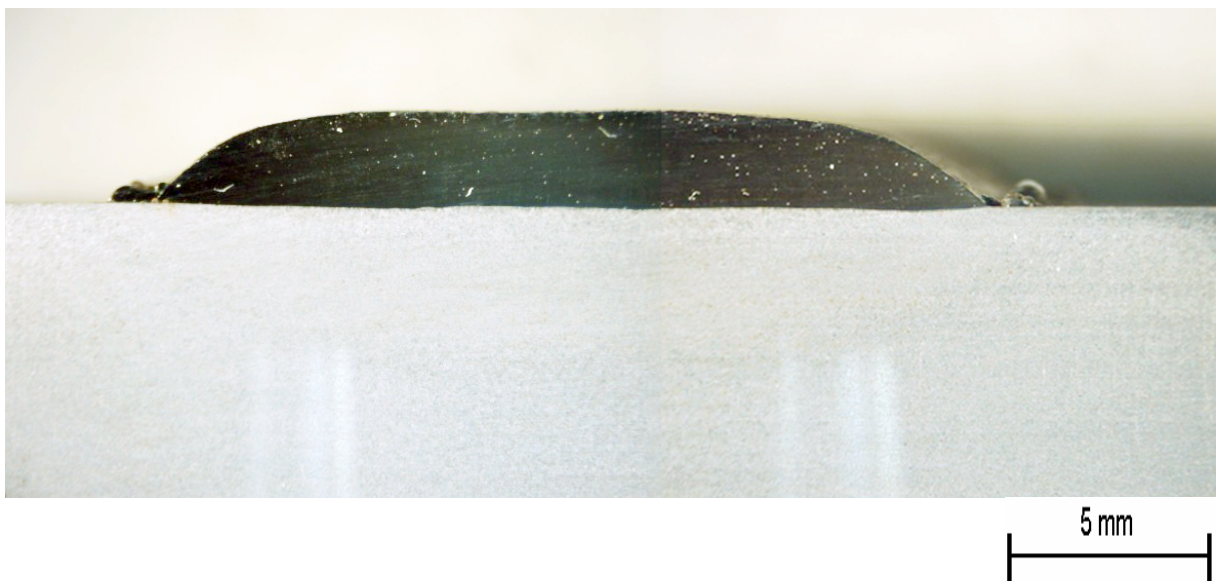


Figura 4.107 – Micrografias das amostras de Stellite 6 para os bicos constritores de 30° e 60°



Aspecto superficial



Seção transversal

Figura 4.108 – Aspecto Superficial e seção transversal de um cordão com largura: 20 mm, reforço: 2,3 mm, diluição: 3,6 %

4.2.9 Efeito do tipo de corrente (corrente contínua constante e corrente contínua pulsada) sobre a resistência à cavitação

4.2.9.1 Introdução

Diante das expectativas de utilizar o processo na recuperação de turbinas hidráulicas erodidas pela cavitação, procedeu-se ao análises do desempenho do processo e da influência do tipo de corrente (corrente contínua constante e corrente contínua pulsada) sobre a resistência à cavitação da liga stellite 6 de acordo com a norma ASTM G-32/92, pelo método indireto. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Cavitação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Os resultados dos revestimentos da liga Stellite 6, realizados com o processo PTAP, são comparados com os revestimentos da liga Cavitec, depositados pelo processo Plasma e MIG.

4.2.9.2 Procedimento experimental

A Liga Stellite 6 foi depositada (uma camada) sobre o substrato de aço inoxidável 304 de dimensões 170x110x8 mm. Foram realizados revestimentos com duas condições de soldagem: Corrente contínua constante e corrente contínua pulsada. As condições de soldagem estão indicadas na Tabela 4.18.

Para cada condição de soldagem foram retiradas 2 (duas) amostras de dimensões de 25x30x10 mm:

- Corrente contínua constante (amostras I_C₁ e I_C₂)
- Corrente contínua pulsada (amostras I_P₁ e I_P₂)

Os corpos de prova foram extraídos dos depósitos por meio de disco abrasivo de corte e a través de fresagem foram determinadas as dimensões exigidas para o ensaio de cavitação (30x25x10 mm) . Em seguida as superfícies foram preparadas para ensaio de cavitação ou metalografia, por lixamento (iniciando com lixa de 180 a um lixamento final com lixa 1000) e polimento com alumina de 0,3 µm.. A Figura 4.109 mostra a região da extração dos corpos de prova.

Tabela 4.18 – Variáveis e parâmetros de soldagem-Ensaio de cavitação

Variáveis		
Corrente média de soldagem	Im(A)	160
Corrente de pulso	Ip(A)	200
Corrente de base	Ib(A)	120
Tempo de pulso	tp(s)	0,1
Tempo de base	tb(s)	0,1
Velocidade de soldagem	Vs(cm/min)	16
Gás de plasma	VGP(l/min)	2,4
Gás de proteção	GPr(l/min)	10
Gás de arraste	GTr(l/min)	2
Taxa de alimentação	Tx(kg/h)	1,4
Diâmetro do bico constritor/ângulo de convergência	d(mm)/(°)	4,8/60
Distância bico-peça	DBP(mm)	10
Recuo	Rc(mm)	2,4

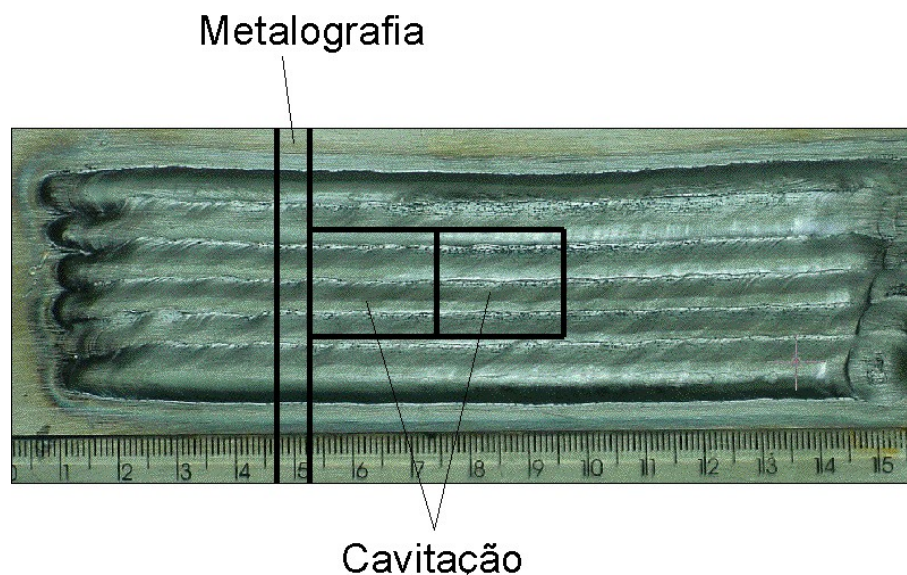


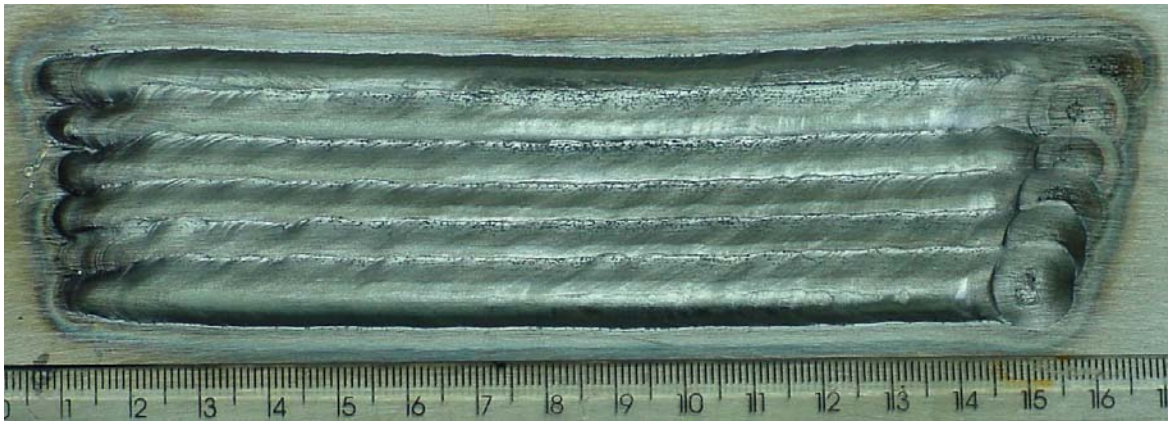
Figura 4.109 – Posições das regiões para a extração dos corpos de prova para os ensaios de cavitação e medição da diluição

Procedimento do ensaio. As amostras foram inicialmente ensaiadas de 2 em 2 horas até que completasse 8 horas, posteriormente o período foi de 7 horas até completar 49 horas. Após cada período a amostra foi submetida a uma limpeza ultra-sônica, secagem e pesagem para se avaliar a perda de massa.

Com os dados obtidos foi possível o levantamento das curvas de perda de massa acumulada ($\Sigma\Delta m$) em função do tempo, bem como a determinação do período de incubação (T_i) e a taxa de erosão (TE).

4.2.9.3 Análises dos resultados

A Figura 4.110 mostra o aspecto dos revestimentos e a Figura 4.111 mostra a seção transversal.



a) Revestimento realizado com corrente contínua constante

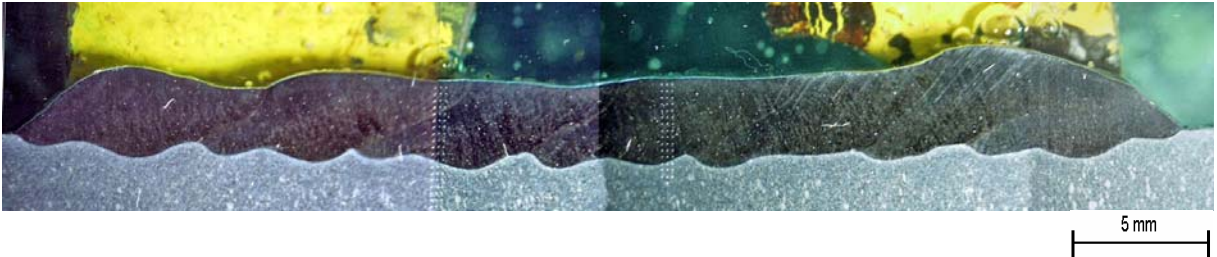


b) Revestimento realizado com corrente contínua pulsada

Figura 4.110 – Aspecto superficial dos revestimentos realizados com corrente contínua constante e corrente contínua pulsada. Uma camada.



a) Revestimento com corrente contínua constante, diluição: 13,22%



b) Revestimento com corrente contínua pulsada, diluição: 13%

Figura 4.111 – Aspecto da seção transversal dos revestimentos

Através da Figura 4.111 foram medidos os valores de diluição: 13,22% para corrente contínua constante e 13% para corrente contínua pulsada. Isto significa que o tipo de corrente empregada, no processo de soldagem, não apresenta uma influência significativa sobre o grau de diluição.

Em seguida foram levantados os perfis de dureza (veja as Figuras 4.112 e 4.113) em duas regiões, da seção transversal, denominadas com A e B, donde a região A, corresponde a medições no centro do cordão e a região B, corresponde a aquela região afetada pelos cordões adjacentes. Das Figuras 4.112 e 4.113 pode ser observar que, não existe uma diferença significativa na dureza entre os revestimentos realizados com corrente contínua constante e com corrente contínua pulsada. Estes resultados de dureza eram esperados devido aos valores similares de diluição entre os revestimentos.

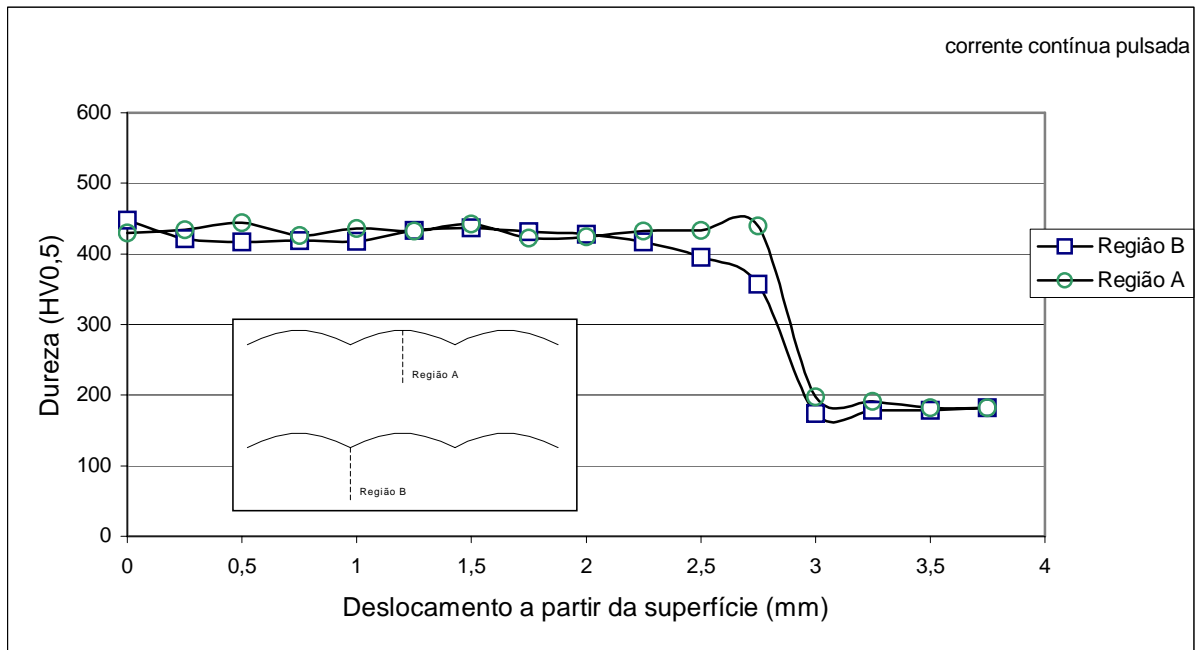


Figura 4.112 – Perfil de dureza apresentado para as regiões A e B do revestimento com corrente contínua pulsada

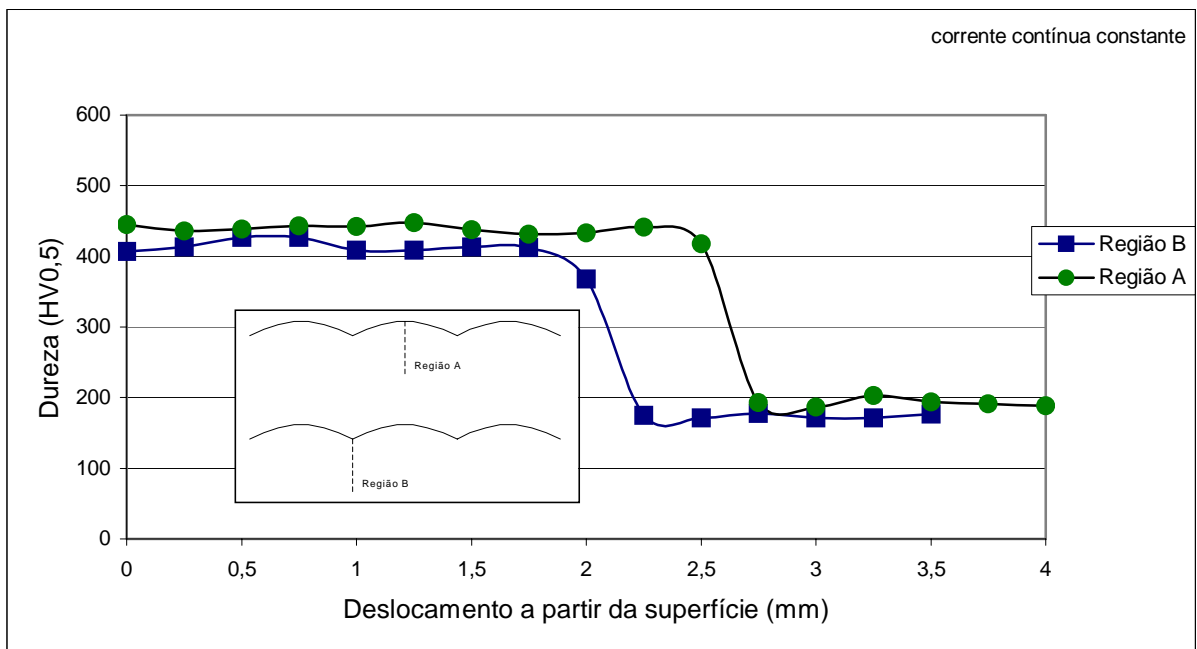


Figura 4.113 – Perfil de dureza apresentado para as regiões A e B do revestimento com corrente contínua constante

A Figura 4.114 mostra a perda de massa acumulada ($\Sigma\Delta m$) em função do tempo de ensaio de cavitação. Observa-se que todas as amostras apresentaram uma resistência alta com relação à erosão por cavitação, já que houve uma perda de massa pouco acentuada com relação ao tempo de ensaio (baixa taxa de erosão). Os tempos de incubação (T_i) foram altos

para este material. A Tabela 4.19 mostra os valores de T_i e T_E para os quatro corpos de prova correspondentes ao processo PTAP, observando-se que não existe uma diferença significativa na resistência á cavitação dos corpos de prova soldados com corrente contínua constante em relação aos corpos de prova soldados com corrente contínua pulsada.

A Figura 4.115 faz uma comparação entre a perda de massa acumulada em função do tempo, dos revestimentos com Stellite 6 x arame Cavitec, depositados pelo processo de soldagem Plasma (Cavplasma) e Mig (CavMig). A comparação com este revestimento é importante pois foi considerado o melhor até o momento, dentro dos que foram ensaiados por este processo. A Tabela 4.20 mostra os valores do T_i e T_E para o Cavplasma e CavMig.

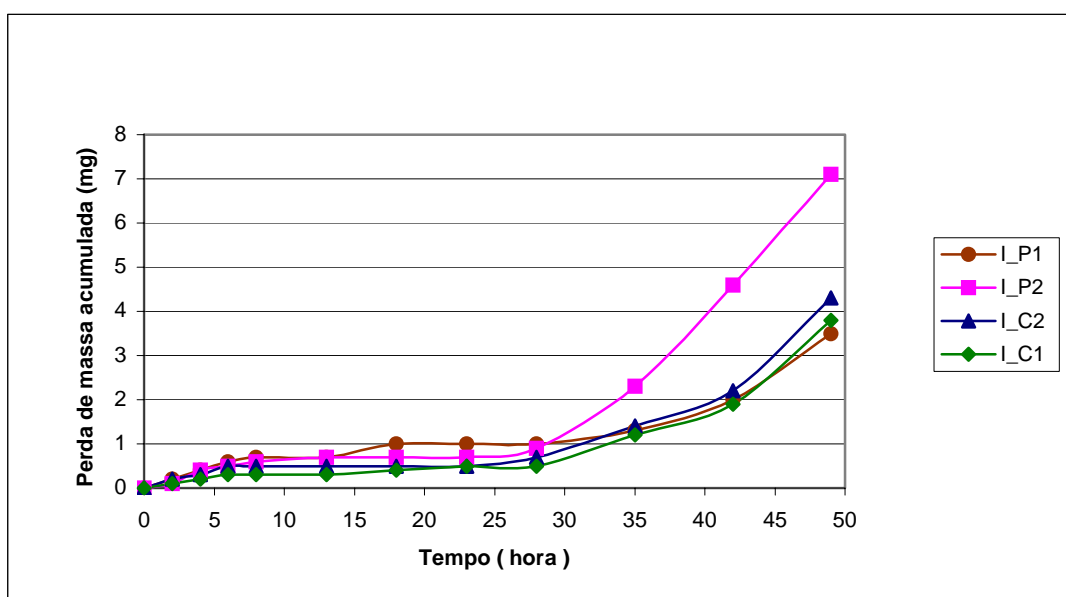


Figura 4.114 – Perda de massa acumulada em função do tempo da liga Stellite 6 depositada sobre o substrato de aço inoxidável 304.

Tabela 4.19 – Tempo de incubação e taxa de erosão da liga Stellite 6 depositada sobre o substrato de aço inoxidável 304.

Amostras PTAP	Tempo de incubação (T_i) (horas)	Taxa de erosão (T_E) (mg / horas)
I_P1	27,6	0,16
I_P2	28,4	0,34
I_C1	29,6	0,19
I_C2	29,3	0,21

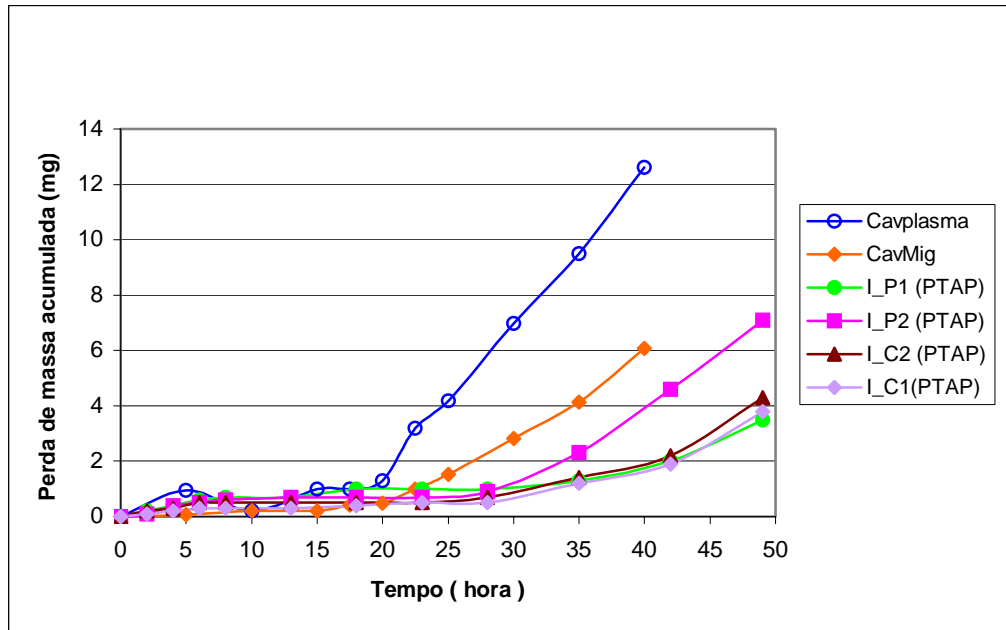


Figura 4.115 – Perda de massa acumulada em função do tempo da liga Stellite 6 x arame Cavitec.

Tabela 4.20 – Tempo de incubação e taxa de erosão dos revestimentos com arame Cavitec depositados pelos processos Plasma (Cavplasma) e Mig (CavMig).

Amostra	Tempo de incubação (Ti) (horas)	Taxa de erosão (TE) (mg / horas)
Cavplasma	20	0,56
CavMig	24	0,34

4.3 Processamento na posição horizontal e sobrecabeça

4.3.1 Introdução

Uma análise da literatura mostrou que os trabalhos que utilizam o processo PTAP abordam, somente, a soldagem na posição plana, não apresentando procedimentos para a deposição em outras posições. Ocorre que, para viabilizar a aplicação do processo PTAP nas mais variadas aplicações na prática, com por exemplo, na recuperação de pás de turbinas hidráulicas que sofreram erosão por cavitação, a identificação de resultados em outras posições é uma condição fundamental. Com o objetivo de conhecer o comportamento do processo fora da posição foram conduzidos alguns experimentos e comparados com os resultados obtidos na posição plana.

4.3.2 Procedimento experimental

As variáveis e parâmetros de soldagem utilizados para a condução de ensaios na posição plana, horizontal e sobrecabeça são apresentados na Tabela 4.21. Realizaram-se testes sobre chapas de aço carbono da classe ABNT 1020, cortadas nas dimensões de 12,5x60x235 mm e esmerilhadas para remoção da camada de óxido.

A Figura 4.116 mostra a posição da tocha de soldagem quando foram realizados os ensaios na posição horizontal. As soldagens realizadas sobrecabeça foram feitas em um plano inclinado a 45° com o plano horizontal. (A Figura 4.117 mostra a posição da tocha de soldagem em relação ao substrato).

O desempenho do processo fora da posição plana foi avaliado a partir dos valores de diluição (δ), largura da solda (L), reforço (R), penetração (P) e profundidade da ZAC (P_{zac}), dureza e microestrutura.

Finalmente o teste de líquido penetrante, foi realizado sobre o revestimento realizado sobrecabeça, para conferir defeitos tais como porosidades e falta de penetração.

Tabela 4.21 – Variáveis e parâmetros de soldagem-Fora de posição

Variáveis		
Corrente média de soldagem	Im(A)	160
Corrente de pulso	Ip(A)	200
Corrente de base	Ib(A)	120
Tempo de pulso	tp(s)	0,1
Tempo de base	tb(s)	0,1
Velocidade de soldagem	Vs(cm/min)	16
Gás de plasma	VGP(l/min)	2,4
Gás de proteção	GPr(l/min)	10
Gás de arraste	GTr(l/min)	2
Taxa de alimentação	Tx(kg/h)	1,4
Diâmetro do bico constritor/ângulo de convergência	d(mm)/(°)	4,8/30-4,8/60
Distância bico-peça	DBP(mm)	10
Recuo	Rc(mm)	2,4



Figura 4.116 – Fotografia ilustrativa da posição da tocha para soldagem horizontal

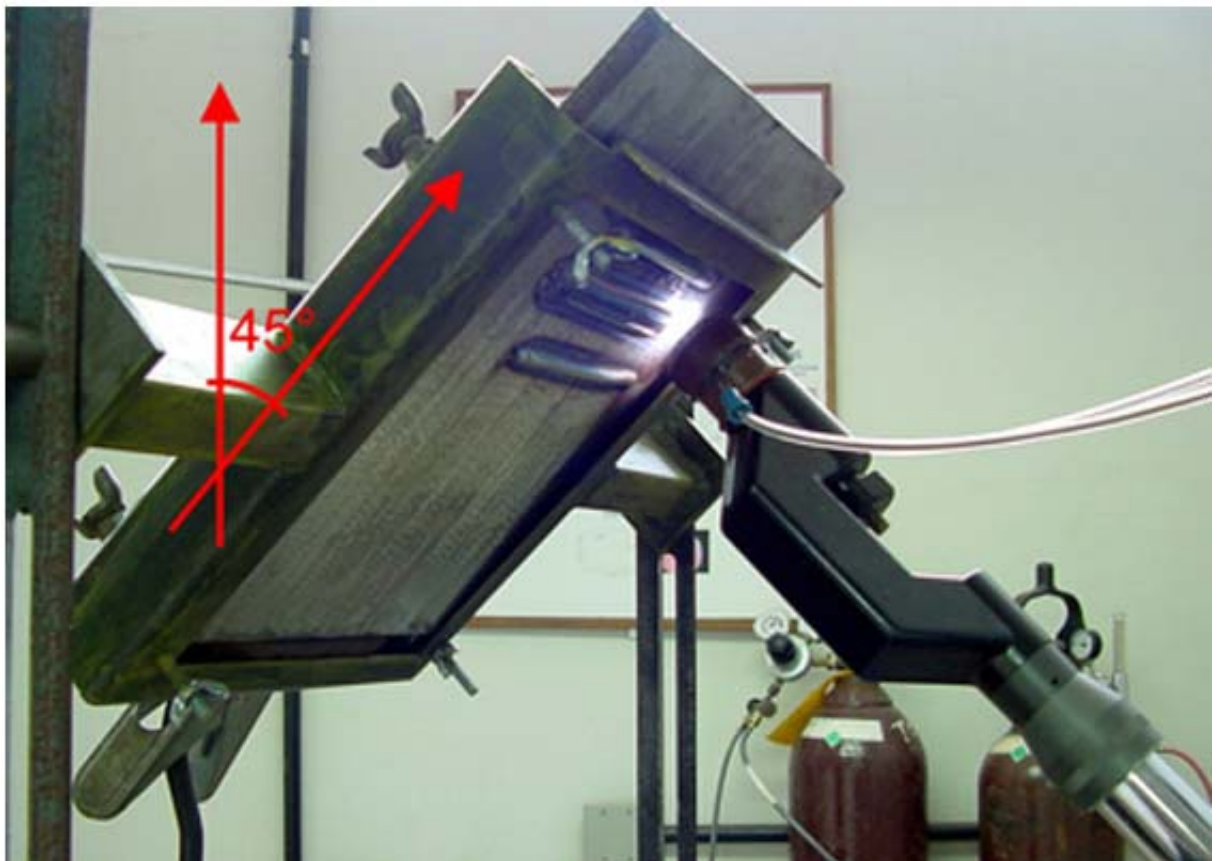


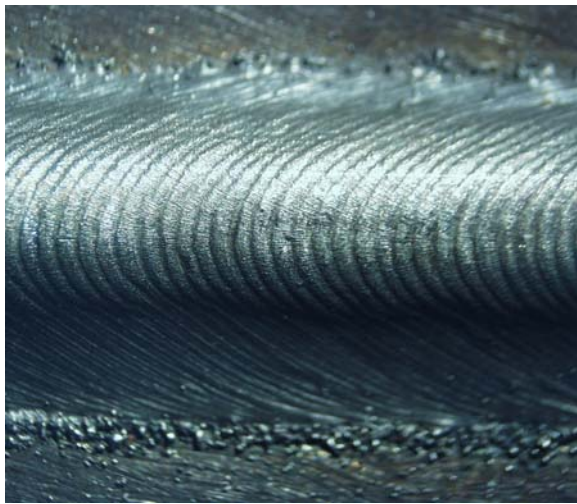
Figura 4.117 – Fotografia ilustrativa da posição da tocha para soldagem sobrecabeça

4.3.3 Análises dos resultados

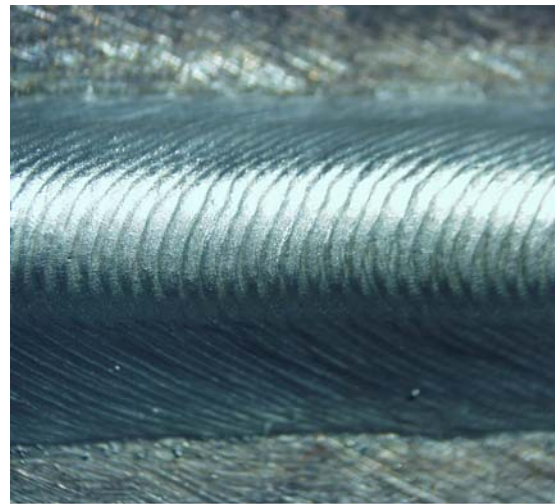
Antes de iniciar o estudo, foi verificado o desempenho do tipo de bico constritor. As Figuras 4.118a e 4.118b mostram as diferenças do aspecto superficial dos depósitos sobrecabeça para os dois tipos de bicos constritores. Observe-se que quando é empregado o bico constritor de 30°, fica pó sem fundir nas laterais dos depósitos (Figura 4.118a) fato que não é observado no bico constritor de 60° (Figura 4.118b). Resultados semelhantes foram encontrados na posição plana.

A influência da variação na vazão do gás de arraste, é verificada neste trabalho, onde foi utilizada uma vazão de gás de arraste de 2, 4 e 6 l/min. As Figuras 4.119a, 4.119b e 4.119c mostram o aspecto superficial dos depósitos. As Figuras 4.120a, 4.120b e 4.120c mostram a seção transversal dos depósitos para três níveis de vazão de gás de arraste.

Segundo Deuis *et al* (1997) os efeitos produzidos pela utilização de uma vazão de gás de arraste elevada, em relação a um valor operacional normal, são mordeduras no cordão de solda. Essas observações divergem dos resultados dos testes realizados neste estudo, observando-se que para uma vazão de gás de arraste de 6 l/min (considerada elevada em relação a 2 l/min), ocorreu falta de fusão em praticamente 71% do cordão (veja Figura 4.120c).

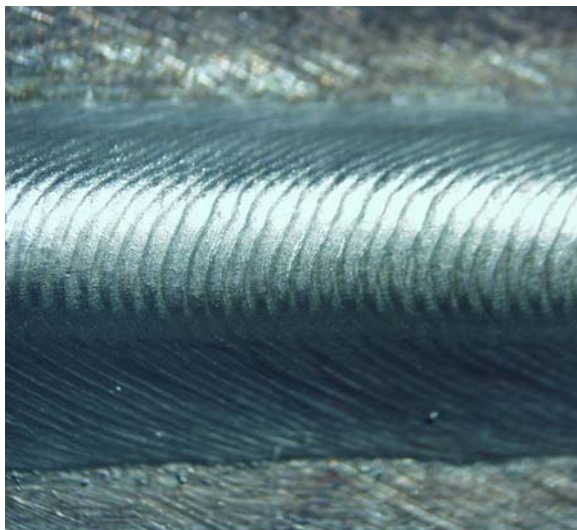


a - Bico constritor de 30°



b - Bico constritor de 60°

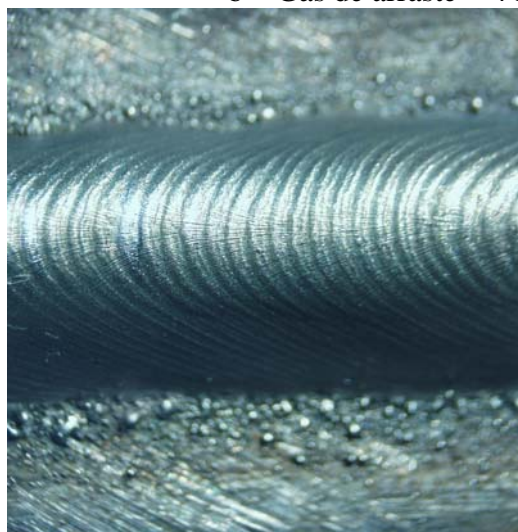
Figura 4.118 – Aspecto superficial dos cordões para dois tipos de bico constritor



a – Gás de arraste = 2 l/min



b – Gás de arraste = 4 l/min



c – Aspecto superficial. Gás de arraste = 6 l/min

Figura 4.119 – Aspecto superficial dos cordões para três níveis de vazão de gás de arraste

Devido a estes fatos, optou-se por trabalhar com um bico constritor de 60° e com uma vazão de gás de arraste de 2 l/min. As Figuras 4.121, 4.122 e 4.123 mostram o aspecto superficial dos cordões obtido na posição plana, horizontal e sobre cabeça, respectivamente. As Figuras 4.124, 4.125 e 4.126 mostram a seção transversal dos cordões, onde é possível observar que o cordão realizado na posição plana (Figura 4.124) apresenta uma diferença significativa na geometria da interface entre o revestimento e o material de base, em relação as outras posições de soldagem, Figuras 4.125 e 4.126. Observe-se na Figura 4.124 que a penetração do cordão de solda está localizado nas laterais e não na região central do perfil do cordão. É uma observação que deve ser considerada na análise dos resultados de dureza, devido a que o perfil de microdureza é realizado no centro do perfil do cordão.

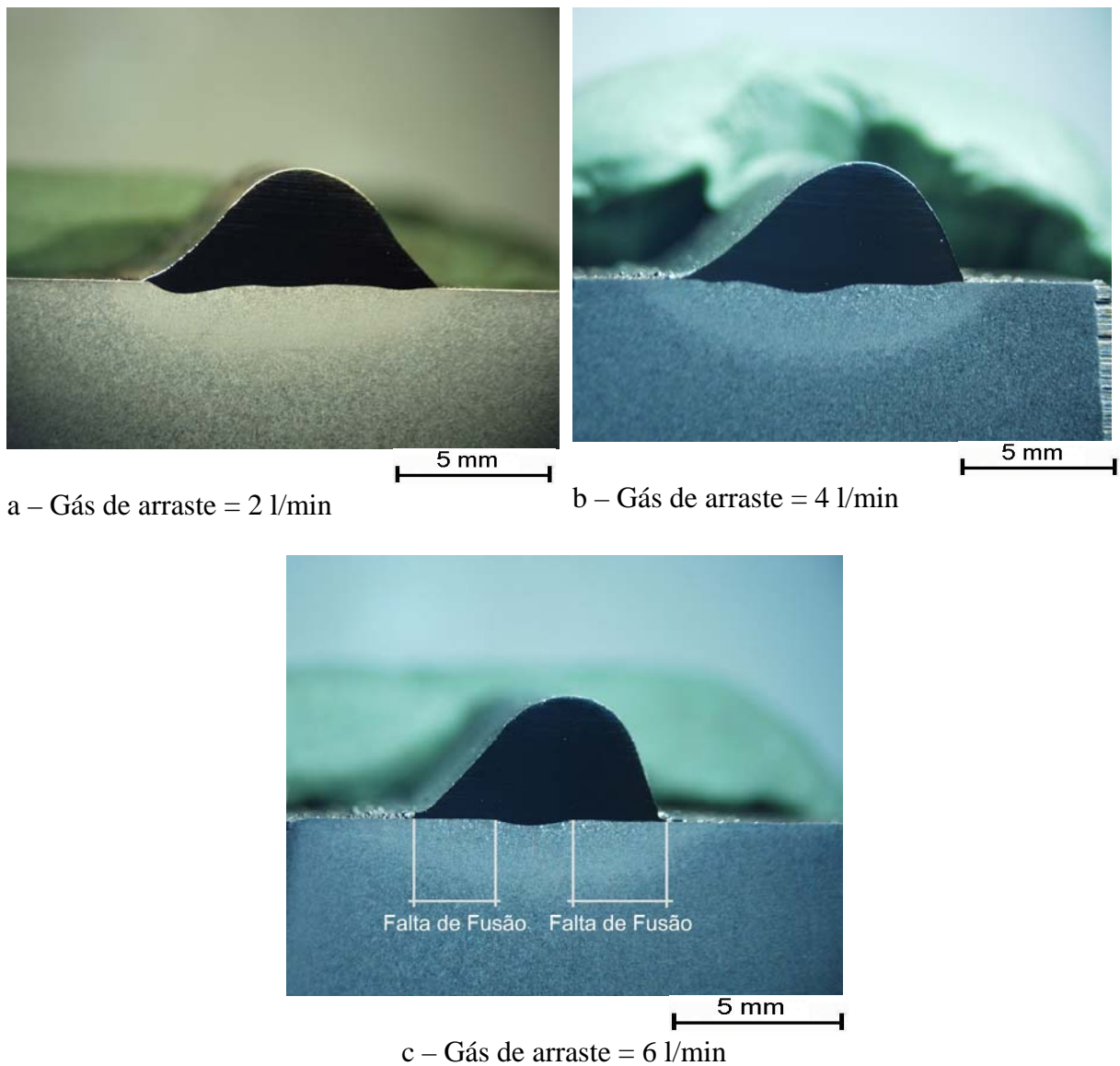


Figura 4.120 – Seção transversal dos depósitos para três níveis de vazão de gás de arraste

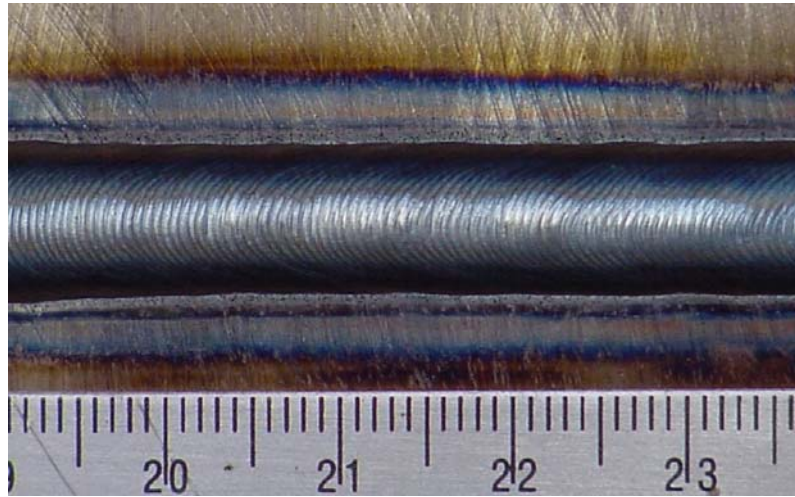


Figura 4.121 – Aspecto superficial do cordão na posição plana

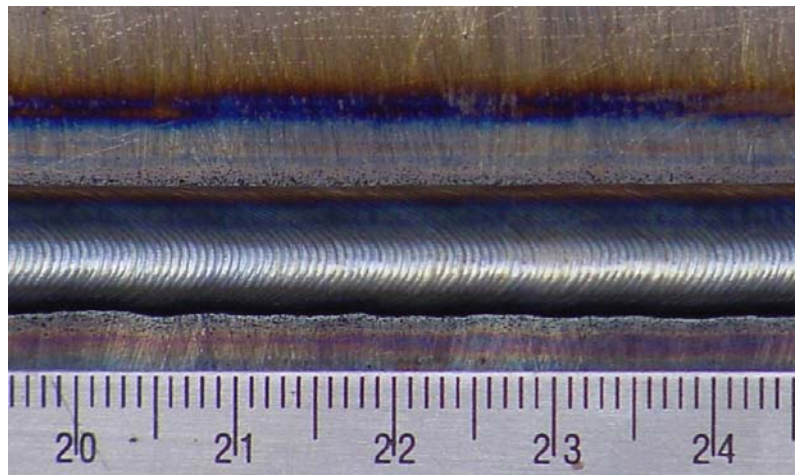


Figura 4.122 – Aspecto superficial do cordão na posição horizontal

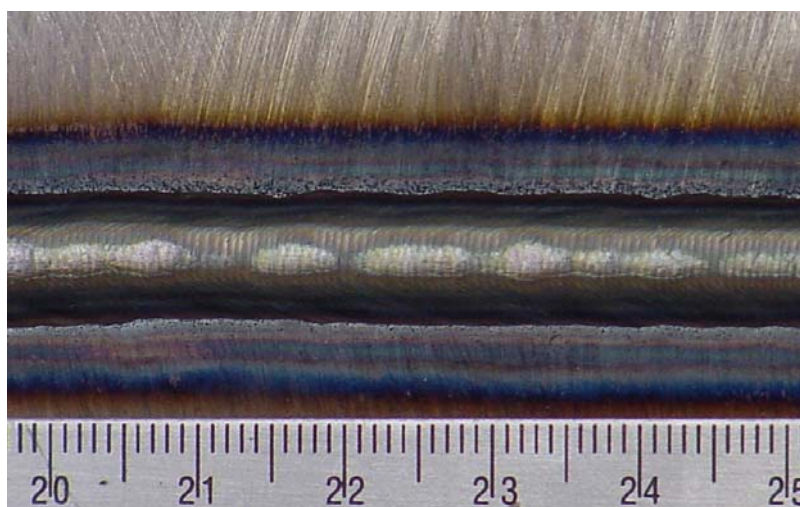


Figura 4.123 – Aspecto superficial do cordão na posição sobrecabeça

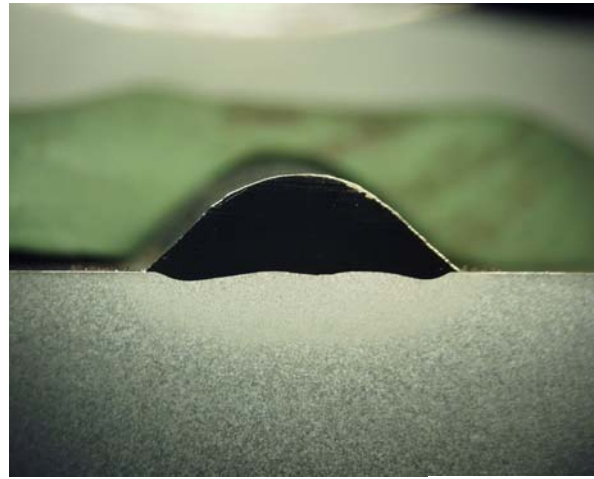


Figura 4.124 – Seção transversal do cordão. Posição plana



Figura 4.125 – Seção transversal do cordão. Posição horizontal



Figura 4.126 – Seção transversal do cordão. Posição sobrecabeça

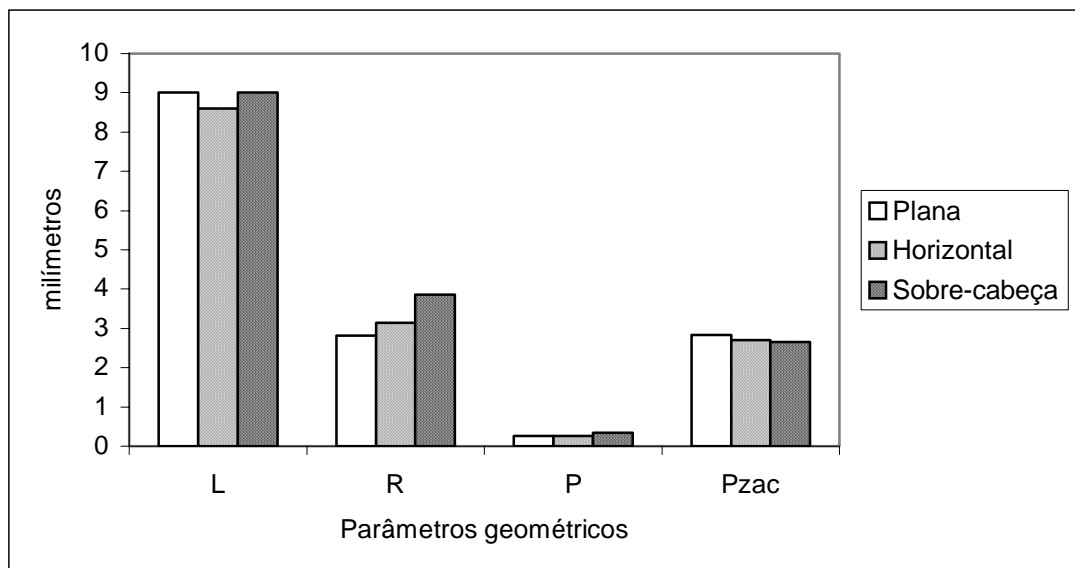
A Tabela 4.22 apresenta os resultados sobre as condições geométricas, tais como largura, reforço, penetração, profundidade da ZAC, grau de diluição. A Figura 4.127 indica o efeito da posição de soldagem sobre as condições geométricas e a Figura 4.128 indica o efeito da posição de soldagem sobre o grau de diluição.

A análise da Figura 4.127, indica que, de uma forma geral, a posição de soldagem não afeta significativamente na largura, penetração e profundidade da ZAC. Pela análise da Figura 4.127 e apoiada com a análise de variância da Tabela 4.23, percebe-se um efeito significativo no tamanho do reforço, apresentando-se os maiores valores na posição sobre cabeça e horizontal, devido a que nesta posição a poça fundida é afetada fortemente pelo efeito da gravidade. A análise da Figura 4.128 mostra que a posição de soldagem não afeta significativamente sobre o grau de diluição dos depósitos.

Tabela 4.22 – Características geométricas dos cordões

	L(mm)	R(mm)	P(mm)	Pzac(mm)	δ (%)
Plana	9,0	3,05	0,26	2,7	5,8
Horizontal	8,6	3,5	0,26	2,66	6,4
Sobrecabeça	9,0	3,7	0,34	2,84	5,5
Revestimento Sobrecabeça	17	3,0	0,6	3,0	

L: Largura; R: Reforço; P: Penetração; Pzac: Profundidade da ZAC; δ : Diluição



L: Largura; R: Reforço; P: Penetração; Pzac: Profundidade da ZAC

Figura 4.127 – Parâmetros geométricos

Tabela 4.23 – Resultados de análise de variância para o reforço da solda

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Média dos quadrados	F observado	F crítico
Reforço	1,11436	2	0,55718	20,02 >	3,89
Residual	0,334	12	0,027833		
Total	1,44836	14			

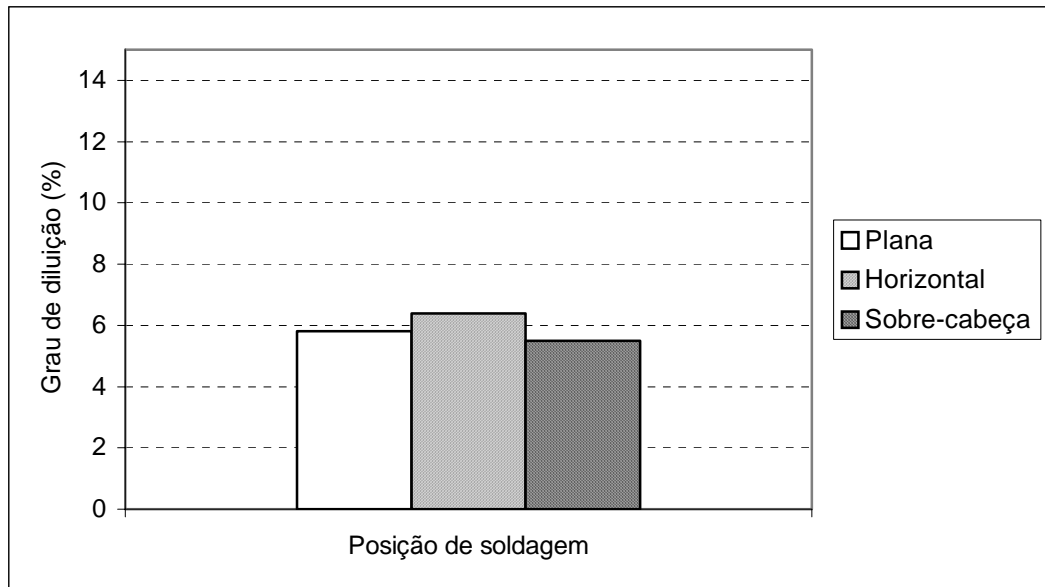


Figura 4.128 – Efeito da posição de soldagem sobre o grau de diluição

As Figuras 4.129, 4.130 e 4.131 mostram as microestruturas típicas, para as três posições de soldagem, com dendritas ricas em cobalto e uma região interdendrítica. A microestrutura consiste de uma região celular dendrítica, dendritas colunares e dendritas equiaxiais a partir da interface em direção a superfície.

A Figura 4.132 mostra os valores do espaçamento interdendrítico, no centro dos depósitos, obtido através de metalografia quantitativa. A análise da Figura 4.132 mostra que a posição de soldagem não afeta significativamente o refinamento de microestrutura e, conseqüentemente, a dureza como mostra a Figura 4.133.

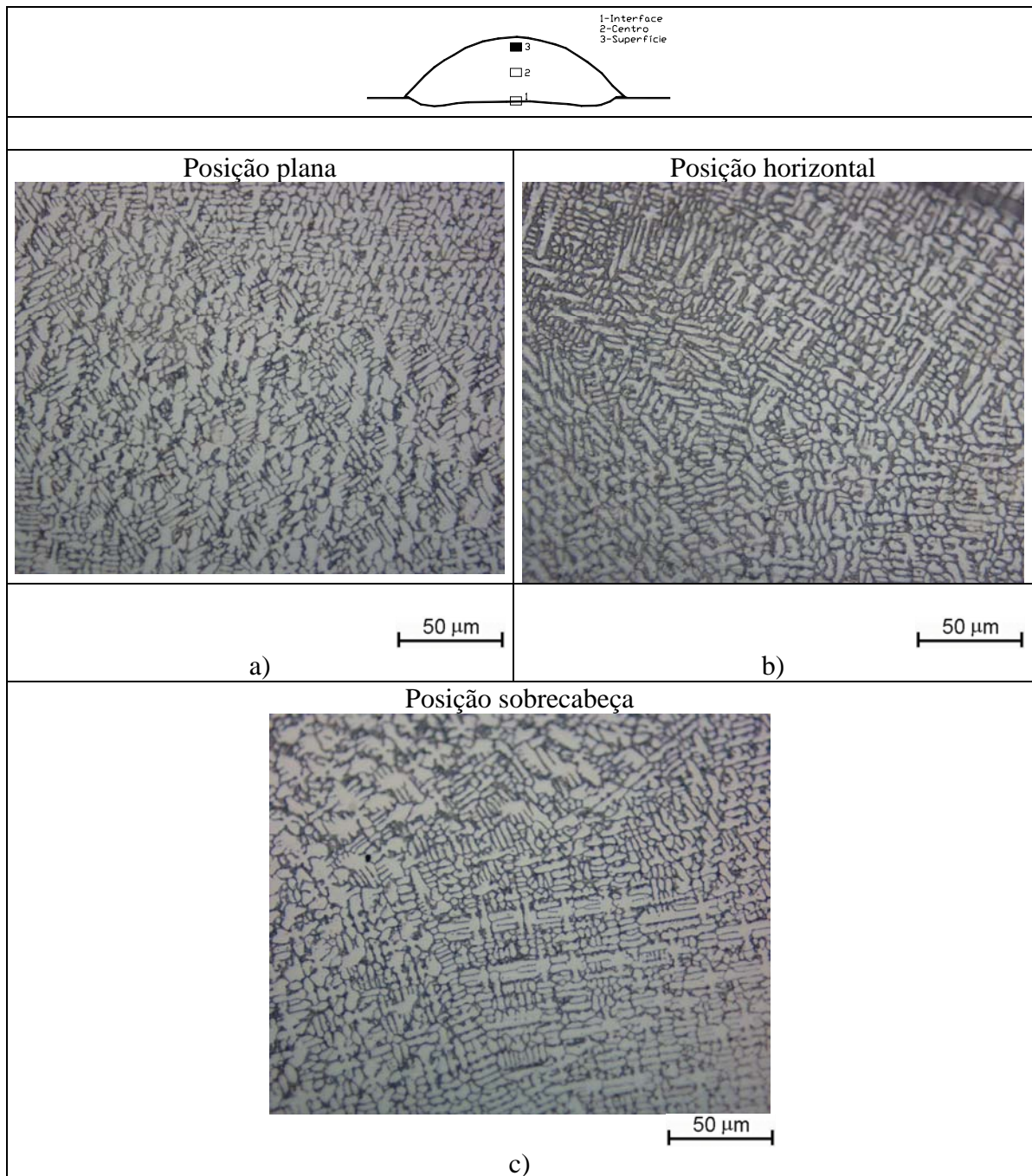


Figura 4.129 – Micrografias das amostras de Stellite 6 junto à superfície. Posição plana/posição horizontal/posição sobrecabeça

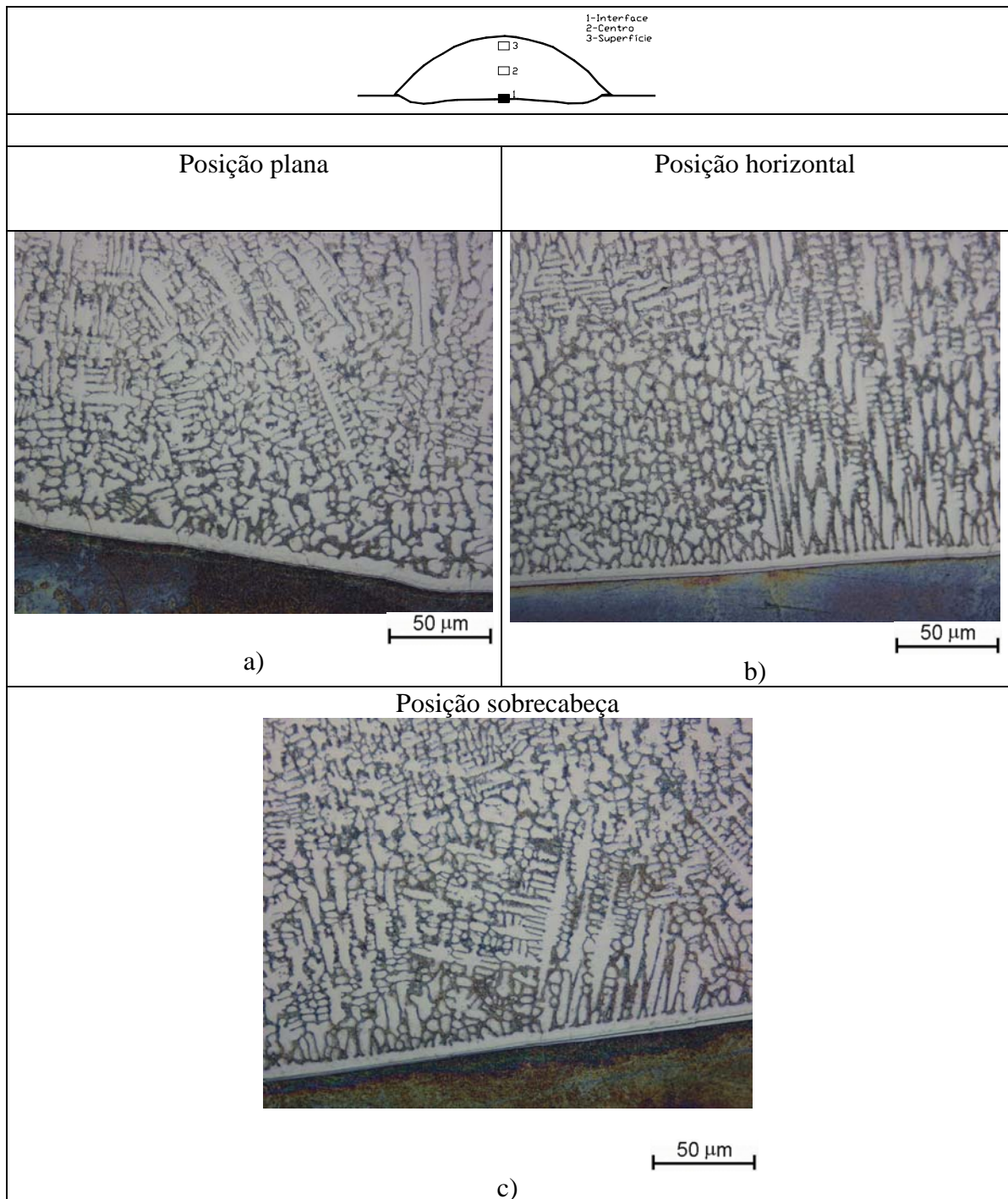


Figura 4.130 – Micrografias da região de ligação substrato-depósito. Posição plana/posição horizontal/posição sobrecabeça

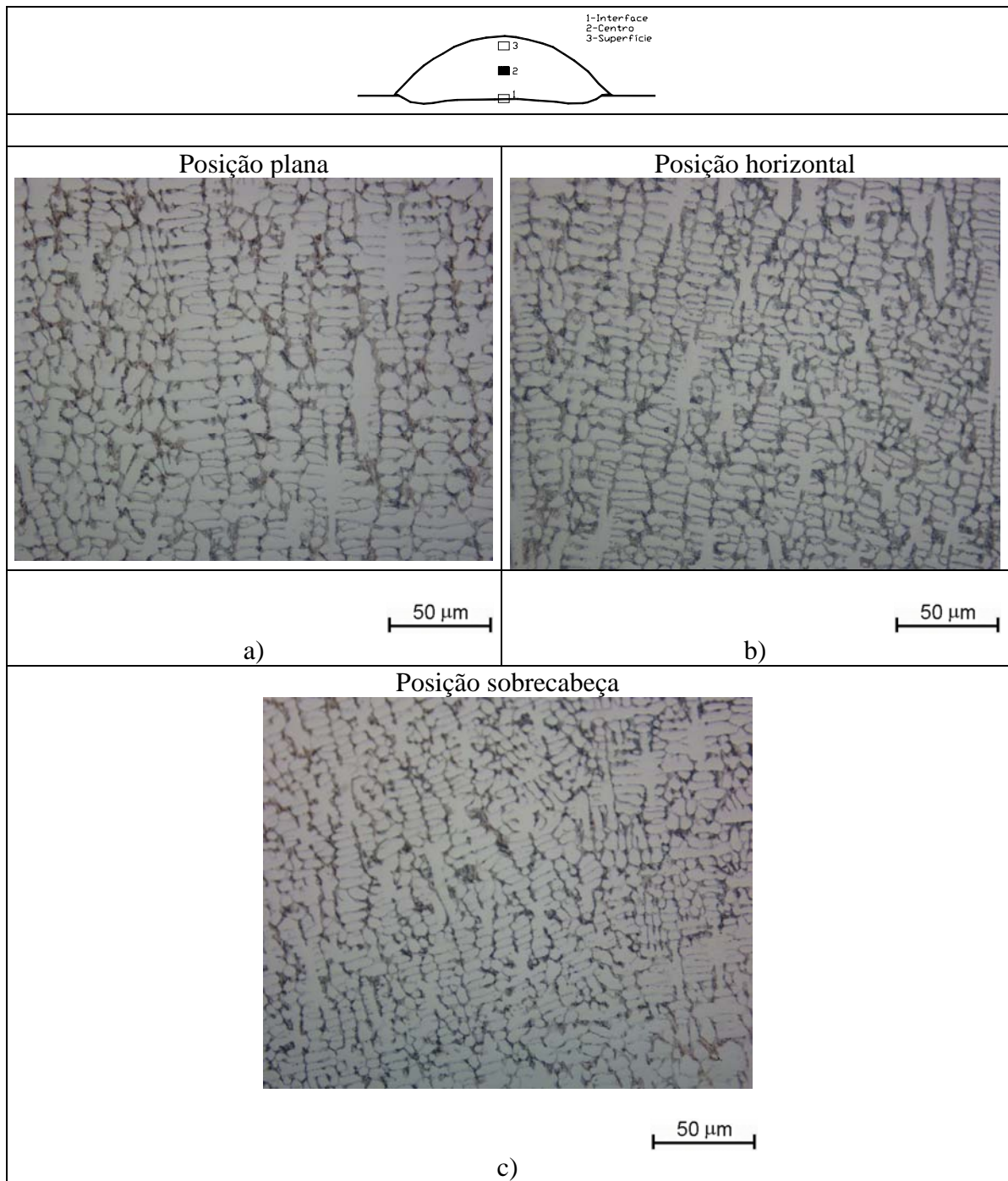


Figura 4.131 – Micrografias da região do centro do depósito. Posição plana/posição horizontal/posição sobrecabeça



Figura 4.132 – Espaçamento dos braços dendríticos no centro dos depósitos. Comparação entre as três posições de soldagem (Plana, Horizontal e Sobre-cabeça)

A Figura 4.133 mostra o perfil de microdureza para as três posições testadas. O deslocamento entre as curvas de dureza representa o tamanho do reforço e a penetração no centro do cordão (H'). A análise da Figura 4.133, reforçada com a análise de variância da Tabela 4.24, indica que, de uma forma geral, a posição de soldagem não afeta significativamente na dureza da região fundida.

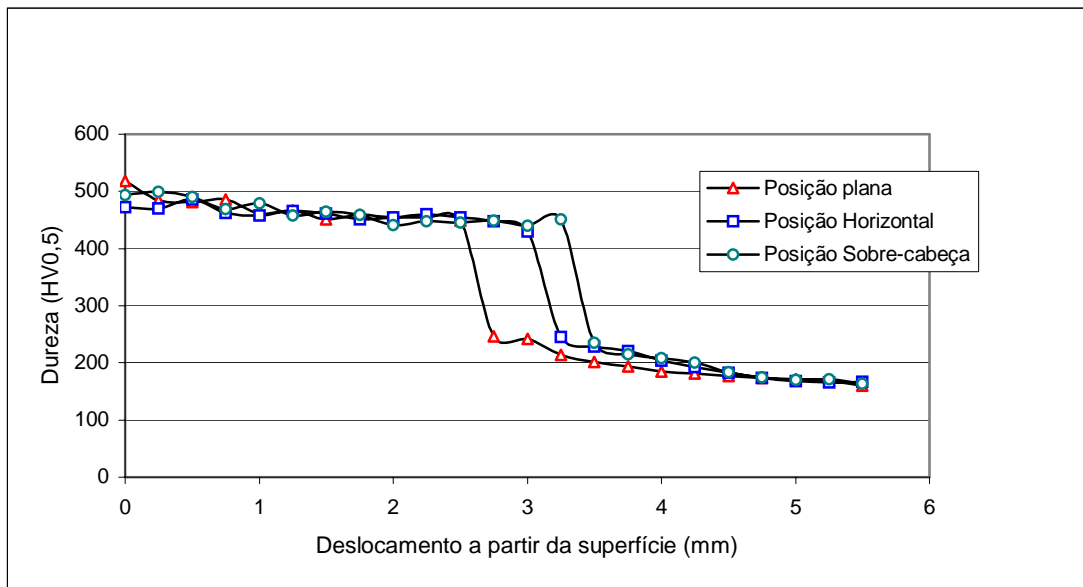


Figura 4.133 – Dureza ao longo da seção transversal dos cordões para diferentes posições de soldagem

Tabela 4.24 – Resultados de análise de variância para a dureza na região fundida

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma dos quadrados</i>	<i>Graus de liberdade</i>	<i>Média dos quadrados</i>	<i>F observado</i>	<i>F crítico</i>
Posição de soldagem	632,1267	2	316,0633	0,94 <	3,27
Residual	11781,49	35	336,614		
Total	12413,62	37			

Uma vez analisados os cordões unitários, procedeu-se a realizar um revestimento na posição sobre cabeça, empregando-se as mesmas condições de soldagem. A Figura 4.134 mostra o aspecto superficial do revestimento obtido na posição sobrecabeça e a Figura 4.135 mostra a sua seção transversal. A região plana, na parte superior dos cordões de solda, é dividida à remoção de material para a execução dos ensaios de líquidos penetrantes com o intuito de verificar trincas e porosidades. A Figura 4.136 apresenta os perfis de microdureza Vickers para um revestimento de uma camada. Para o revestimento foram selecionadas duas regiões para a medição da microdureza, segundo indica a Figura 4.135.

No revestimento, nas duas regiões selecionadas, a microdureza média foi de 443 e 444 HV0,5, respectivamente.

Finalmente o teste de líquido penetrante, realizados sobre o revestimento, mostrou que não ocorreram defeitos como porosidades, falta de penetração e qualquer tipo de trinca. A Figura 4.137, mostra a superfície ensaiada.

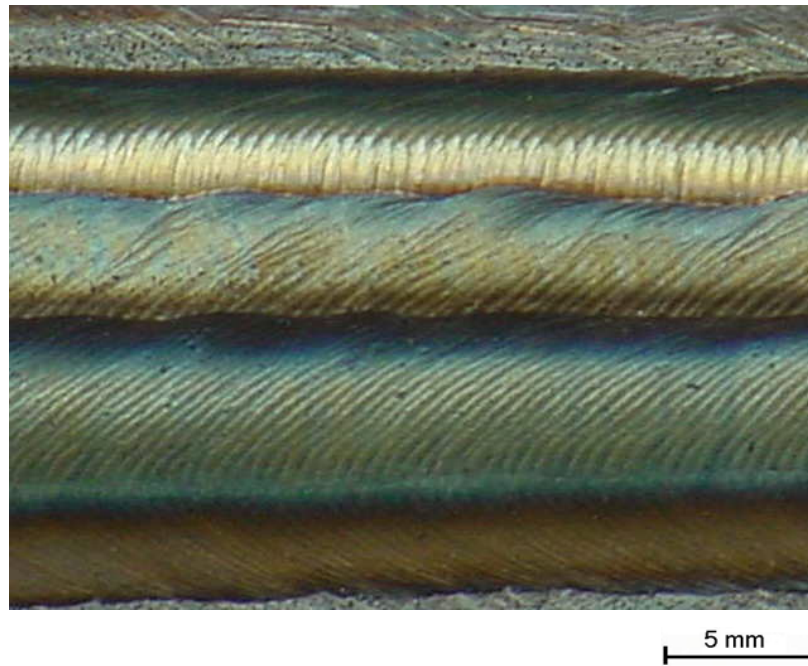


Figura 4.134 – Aspecto superficial do revestimento uma camada

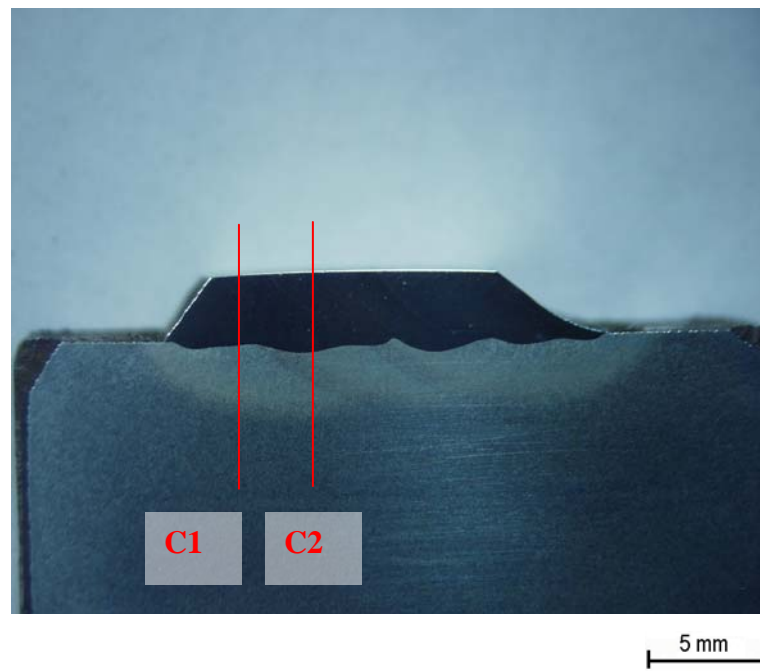


Figura 4.135 – Corte da seção transversal. Características do perfil de penetração e ZAC
C1, C2: Regiões das medições de microdureza

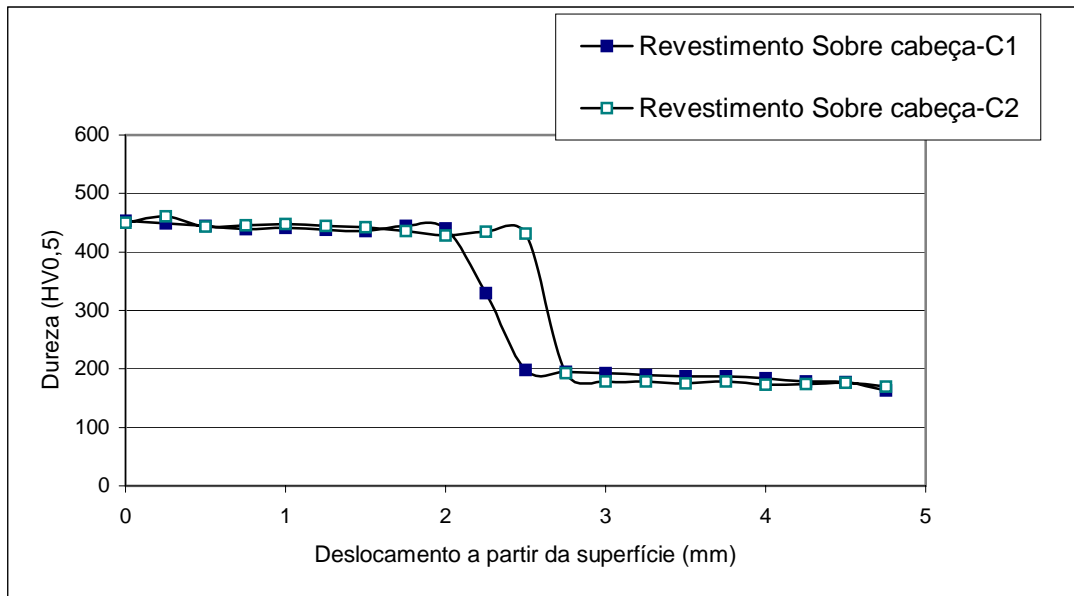


Figura 4.136 – Dureza Vickers ao longo da seção transversal para um cordão de solda e para o revestimento (regiões C1 e C2)



Figura 4.137 – Resultado do ensaio com líquido penetrante

CAPITULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

a) Além da geração de conhecimento científico do processo, foi desenvolvido um equipamento PTAP, tecnologicamente avançado, tanto para pesquisa, como para trabalho industrial, possibilitando fazer revestimentos com excelente acabamento superficial e ausência de defeitos como porosidades e falta de fusão.

b) Para a soldagem em posições forçadas foram conseguidos resultados inéditos, tornando-se o LABSOLDA pioneiro em revestimentos fora da posição plana neste processo de soldagem. Foram analisados os depósitos na posição horizontal e sobre cabeça através da modulação com corrente contínua pulsada. Os depósitos apresentaram excelente aparência e sustentabilidade da poça. O corte transversal do revestimento e ensaios com líquido penetrante permitiram observar ausência de defeitos tais como porosidade, falta de fusão e mordeduras.

Com isto abre-se uma nova perspectiva para revestimentos metálicos fora da posição plana e, neste contexto, se insere a recuperação por soldagem de partes erodidas de turbinas hidráulicas.

c) Quando comparados os processos de soldagem de arco transferido alimentado com arame - PTAA e o processo de soldagem de arco transferido alimentado com pó - PTAP, este apresenta menores graus de diluição e microestrutura mais fina, garantindo melhores características metalúrgicas nos revestimentos.

d) Os resultados indicam que o tipo de bico constritor e o gás de arraste apresentam uma grande influência sobre o formato do arco plasma e como consequência na geometria do cordão, interface do depósito e no grau de diluição.

e) Os resultados indicaram que o bico constritor de 60°, apresentou um melhor desempenho em relação ao bico constritor de 30°.

f) A técnica do tecimento mecânico mostrou ser uma boa ferramenta na produção de depósitos. Foram conseguidos valores na largura do cordão entre 15 a 20 mm obtendo-se cordões com até o dobro de largura daqueles depositados sem tecimento.

g) Entre os cordões da liga Stellite 6 depositados pelo processo PTAP usando corrente contínua constante e corrente contínua pulsada, não foi observada diferença significativa na resistência ao desgaste nos ensaios de Pino sobre Disco.

Os ensaios de cavitação revelaram que não existe uma diferença significativa na resistência à cavitação dos revestimentos da liga Stellite 6 depositados pelo processo PTAP usando corrente contínua constante e corrente contínua pulsada.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

a) Projetar e fabricar um bico constritor de 45° e comparar o desempenho com os resultados já obtidos com os bicos de 30° e 60°.

b) Avaliação de desempenho do processo na aplicação manual. Esta etapa considera a importação de uma tocha, fabricada especificamente para esta aplicação pela DURUM ou adaptar uma tocha convencional, como por exemplo a tocha PWH/M-3A da Thermal Dynamics Corporation, que suporta correntes de até 150 A em polaridade direta.

c) Aumentar a corrente do arco piloto de 14 para 100 A, desta forma o arco piloto fica mais rígido, e por tanto, menos sensível aos efeitos produzidos pelos jatos do gás de arraste. Avaliar o efeito sobre os revestimentos.

d) Modificar o projeto do alimentador de pó para obter maiores taxas de deposição, entre 5 e 10 kg/h. O projeto atual permite uma taxa de deposição máxima de 2 kg/h.

e) Realizar um estudo sobre a influência das misturas de gases utilizadas em: plasma, transporte e proteção. Segundo estudos realizados na Alemanha, no caso de deposições de ligas de metal duro sobre um substrato de ferro, a resistência ao desgaste dos revestimentos foi melhorada adicionando nitrogênio aos gases do processo.

f) Utilizar a corrente alternada para verificar a influência sobre a viscosidade do banho, principalmente para melhorar o desempenho de depósitos fora de posição.

g) Verificar a influência da configuração da tocha desenvolvida por Mekideche (1989), sobre cordões realizados na posição horizontal, para compensar o peso da poça através da força exercida pelo jato de gás de arraste.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

BELKACEM B. et al. Utilisation of high-temperature plasmas containing nitrogen for reactive coating by means of plasma-arc weld surfacing. In: Welding & Cutting, nº 8, p. 170-,172. 2001.

BARRA, Sérgio. Influência dos Procedimentos de Soldagem sobre a Resistência à Cavitação de Depósitos Obtidos com a Utilização de Arames Tubulares de Aços Inoxidáveis Ligados ao Cobalto. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – programa de Pós-Graduação em Engenharia mecânica, UFSC, Florianópolis.

COMMERSALD, Itália, 2004. <http://www.commersald.com>

DAI, W. S. et al. SiO₂ particle erosion of spheroidal graphite cast iron after surface remelting by the plasma transferred arc process. Wear, 2001, 201-210.

DAVIS, J. R. – Davis and Associates. Hardfacing, Weld Cladding and Dissimilar Metal Joining. In: ASM Handbook – Welding, Brazing and Soldering, Vol. 6. 10th ed. OH: ASM Metals Park, 1993. p. 699-828.

DEUIS, R. L. et al. Metal Matrix composite coatings by PTA surfacing, University of South Australia, p.299-309,1997. (ELSEVIER).

DURUM. Catálogo, 2004.

ELECTRONICS MAGNETIC OSCILLATOR OM TYPE.

<http://www.ijnet.or.jp/kilony/product/o/om-e.htm>

FOLTRAN, Bruna. Comparação dos Revestimentos de Superligas à Base de Cobalto (Co-Cr-W-C) depositados por eletrodo revestido, plasma de arco transferido e laser.2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia (PIPE), UFPR, Curitiba

GATTO A. et al. Plasma Transferred Arc deposition of powdered high performances alloys: process parameters optimization as a function of alloy and geometrical configuration. *Surface & Coatings Technology*, February, 2004.

HALLÉN, H. et al. Plasma Transferred Arc Surfacing with High Deposition Rates. Proceedings of the Fourth National Thermal Spray Conference. Pittsburgh, PA, USA, May 1991. p.537 a 539.

HUANG, X. et al. Applications of PTA powder welding in petroleum chemical industry. In: Proceedings of the 15th international Thermal Spray Conference, BEIJING, CHINA, May. 1998.

HIDAKA, K. et al. Characteristics of New Chromium Base Alloys for PTA Process. In: Proceedings of the 1993 National Thermal Spray Conference, Anaheim, June. 1993

HOU, Q. Y. et al. Microstructure and wear characteristics of cobalt-based alloy deposited by plasma transferred arc weld surfacing. *Surface & Coatings Technology*, July, 2004.

KOU, Sindo. *Welding Metallurgy*. Book, John Wiley & Sons. 1987

KUWABARRA, E. Y. Revestimento de Níquel Reforçados com WC Depositados por Plasma com Arco Transferido. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Uberlândia-MG, Maio. 2003

LIN, J. A simple model of powder catchment in coaxial laser cladding. *Optics & Laser Technology*, 1999, 233-238

LIMA C. R. et al. Estudo comparativo das propriedades de revestimentos a base de cobalto (Stellite) aplicados por soldagem e aspersão térmica. In: XXIV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, XI Congresso Latino-Americano e V Ibero-Americano de Soldagem, Fortaleza-CE, Setembro. 1998.

LUCAS, W. TIG and Plasma Welding: Process techniques, recommended practices and applications. In: Metal Construction, p. 659-667. 1982.

MEKIDECHE A. Ait. Plasma-Pulver-Auftragschweiben verschleibfester Pseudohartlegierungssysteme auf Cobalt-Chrom-Wolfram-Kohlenstoff-Basis. Doktor-Ingenieurs Dissertation, Rheinisch-Westfälischen-Technischen Hochschule Aachen, 1989.

OLIVEIRA, M. A. Estudo do processo plasma com alimentação automática de arame. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis.

PLASMA TEAM: Powder Plasma Arc Weldings e Equipments. Località LE VAIE I-15061 ARQUATA SCRIVIA (AL) -ITALY. 2002.

RAGHU, D. et al. PTA proves its worth in high-volume hardfacing jobs. In: Welding Journal, USA, p.34-40, February. 1996.

SPIVAKOVSKY, A. et al. Conveyor and Related Equipment. Peace Publishers Moscow. (1970).

SILVÉRIO, R. et al. Revestimento de Liga a Base de Cobalto por PTA com Alimentação de Pó e Arame. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Uberlândia-MG, Maio. 2003

SANTOS, R. L. C. Deposição por Plasma de Arco Transferido com Corrente Pulsada. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFPR, Curitiba

VERGARA, V. et al. Desempenho do processo plasma de arco transferido alimentado com pó na posição horizontal e sobre-cabeça. In: Congreso Chileno de Ingeniería Mecánica COCIM 2004, Antofagasta, Chile, Agosto. 2004.

Welding Handbook. AWS, v.2 – Welding Process, eighth edition, 1991.

YANG, L. J. The wear properties of plasma transferred arc cladded stellite specimens. Surface & Coatings Technology, 1995, 196-200.