**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

PAULO CÉZAR MOSELLI

Desenvolvimento de dispositivo, adaptado à tocha SATG, para a realização de revestimento duro, utilizando ligas, em forma de pó.

São Carlos
2013

PAULO CÉZAR MOSELLI

Desenvolvimento de dispositivo, adaptado à tocha SATG, para a realização de revestimento duro, utilizando ligas, em forma de pó.

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Falcão de Oliveira

Versão corrigida, original na unidade

São Carlos

2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

M898d Moselli, Paulo César
Desenvolvimento de dispositivo, adaptado à tocha
SATG, para a realização de revestimento duro, utilizando
ligas, em forma de pó / Paulo César Moselli; orientador
Marcelo Falcão de Oliveira. São Carlos, 2013.

Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação
em Ciência e Engenharia de Materiais e área de concentração
em Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais
– Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de
São Paulo, 2013.

1. SATG. 2. PAT-P. 3. Revestimento Duro. 4.
Resistência ao Desgaste. 5. Stellite 6. 6. Pó. I – Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **PAULO CESAR MOSELLI**.

Título da tese: "Desenvolvimento de dispositivo, adaptado à tocha SATG, para a realização de revestimento duro, utilizando ligas, em forma de pó".

Data da defesa: 11/09/2013

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Marcelo Falcão de Oliveira (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Haroldo Cavalcanti Pinto**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Yukio Kobayashi**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP-Bauru)

Aprovado

Prof. Dr. **Claudemiro Bolfarini**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovado

Prof. Titular **Luiz Carlos Casteletti**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

SCCasteletti
Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de
Materias:

Prof. Titular **Waldek Wladimir Bose Filho**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

Dedico este trabalho à minha esposa Renata, aos meus filhos Vinícius, Renato e Lucas, pelo apoio incondicional e incentivo para a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, quero agradecer a Deus e a todas as pessoas que, direta ou indiretamente contribuíram, não só pela realização deste trabalho, mas também, por todo o processo de aprendizado, durante este período.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Prof. Marcelo Falcão de Oliveira, pela orientação, oportunidade e confiança em mim depositada.

Aos meus amigos Profs. Eurico Pedroso de Almeida Junior e Devanil Antonio Francisco, pelo apoio incondicional, para a realização deste doutorado.

À UTFPR, pela liberação do meu afastamento total, para a realização deste doutorado.

À Direção do campus e Coordenações dos Cursos da área de Mecânica, pela liberação para a utilização dos Laboratórios do Campus Cornélio Procópio da UTFPR, para a realização dos experimentos deste trabalho.

Ao amigo Prof. João Roberto Moreno Sartori, pela colaboração, orientação na interpretação dos resultados e redação de artigos relacionados ao trabalho.

Aos Profs. da área de Mecânica, da UTFPR, pelo apoio e colaboração, durante a realização dos ensaios executados no Campus Cornélio Procópio, da UTFPR.

Aos amigos Profs. Maurício Iwama Takano e Romeu Rony Cavalcante da Costa, pelo apoio na confecção dos desenhos do protótipo, bem como, nos trabalhos de simulação.

Aos amigos Wanderlei Malaquias, Tecnólogo em Mecânica e Danilo Montilha Leonardi, Graduado em Engenharia Mecânica da (UTFPR) Campus Cornélio Procópio, pelo auxílio na usinagem e montagem dos protótipos.

Ao aluno de graduação do curso de Engenharia de Materiais, Pedro Sahib Guimarães, pelo auxílio na realização dos ensaios de micrografia e desgaste.

Aos amigos do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais da USP-São Carlos, os quais tive a satisfação e alegria de conhecê-los e conviver com eles.

Aos professores Admilson Teixeira Franco e Rigoberto Eleazar Melgarejo Morales, do Laboratório de Ciências Térmicas da UTFPR-CT, pela colaboração e empréstimo da câmera de alta velocidade.

Aos amigos Wagner Godoy, Rodrigo Pallacios, Ricardo Breganon, pelo incentivo e companhia, durante as viagens intermináveis.

Aos Servidores do Departamento de Materiais da EESC, da USP-São Carlos, pelo pronto atendimento na realização e orientação dos ensaios de metalografia e desgaste, realizados neste departamento.

Aos Servidores da Agência USP de Inovação, pelo excelente trabalho realizado nos procedimentos de patenteamento do dispositivo, desenvolvido neste trabalho.

À amiga, Profa. Lilian Madi, pelo auxílio na revisão ortográfica deste trabalho.

***“A crítica dos outros só poderá
trazer-lhe prejuízo se você
consentir”***

Emmanuel

DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA

Relação de artigos originados deste trabalho:

MOSELLI, P. C., de Oliveira, M. F., Moreno, J. R. S. **Desenvolvimento da aplicação de revestimento duro em substrato SAE 1020 pelo processo de soldagem GTAW com liga Stellite 6 na forma de pó.** 20º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciencia dos Materiais, Joinvile, 2012.

MOSELLI, P. C., de Oliveira, M. F., Moreno, J. R. S. **Deposited properties in hardfacing SAE 1020 substrate by using alloy welding GTAW Stellite 6 in powder form.** 22nd International Conference on Production Research. Fóz do Iguaçu, 2013.

MOSELLI, P. C., de Oliveira, M. F., Moreno, J. R. S. **Development of an adapted device to the GTAW torch to perform the hardfacing by using alloys in powder form.** In: International Congress on Engineering and Information, Macau, 2013.

Pedido de Patente: UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO; UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. MOSELLI, P.C.; OLIVEIRA, M.F. **Dispositivo de Revestimento de Superfícies Metálicas e sua Montagem.** BR n. PI 10 2013 001677-2, 23 jan. 2013.

RESUMO

MOSELLI, P. C. (2013). **Desenvolvimento de dispositivo, adaptado à tocha SATG, para a realização de revestimento duro, utilizando ligas, em forma de pó.** 142 f Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2013.

Este trabalho inova a aplicação de revestimentos duros usando o processo de soldagem SATG (Soldagem ao Arco Tungstênio com Atmosfera Gasosa) utilizando ligas, em forma de pó, incorporadas diretamente à poça de solda. Devido à boa resistência ao desgaste, utilizou-se a liga Stellite 6, no substrato SAE 1020. Dados de microdureza Vickers, taxa de deposição, diluição, análise micrográfica e desgaste foram comparados com resultados do PAT-P (Plasma por Arco Transferido-Pó) e permitiram avaliar a técnica proposta. Os resultados mostraram um revestimento pelo processo SATG-pó livre de poros, sem oxidação na superfície e diluição superior, ao processo PAT-P. Porém, o consumo de gás foi menor, devido à redução da vazão do gás de arraste e da não utilização de gás plasma. A análise microestrutural evidenciou uma microestrutura similar, para ambos os processos, mas o processo PAT-P apresentou uma microestrutura mais refinada. Obteve-se, pelo processo SATG-pó semi-automático, microdurezas entre 400 e 500 HV e uma taxa de diluição de 5%, próximas aos valores do processo PAT-P. Quanto ao desgaste, observaram-se valores também bem próximos para os três processos.

Palavras-chave: SATG. PAT-P. Revestimento duro. Resistência ao desgaste. Pó. Stellite 6.

ABSTRACT

MOSELLI, P. C. (2013). **Development of an adapted device for GTAW torchs to perform hardfacing by applying powdered alloys.** 142 f. Thesis (Doctoral) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

This work innovates the application of hardfacing by using the welding process GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) using alloys in the powder form and directly embedded in the weld pool. Due to the good wear resistance it was used Stellite 6 alloy for hardfacing the substrate SAE 1020. Vickers hardness data, deposition rate, dilution, micrographic analysis and wear results were compared with the PTA-P (Plasma Transferred Arc-Powder) in order to evaluate the proposed technique. The results showed a coating produced by the process GTAW-powder free of pores, without surface oxidation and higher dilution in comparison with the PTA-P process. However, gas consumption was lower due to reduced flow of the carrier gas and as it was not used as plasma gas. Microstructural analysis showed a similar microstructure for both processes, but the PTA-P process presented a more refined microstructure. It was obtained, by the semi-automatic GTAW-powder process, micro hardness between 400 and 500HV and rate dilution of 5%, values close to the PTA-P process. As for the wear it was observed values very close too, for the three process.

Key words: GTAW. PTA-P. Hardfacing. Wear resistance. Powder. Stellite 6.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - (a) Stellite 1, 2 camadas depositadas por GTAW (b) Stellite 6, 2 camadas depositadas por GTAW (c) Stellite 12, 2 camadas depositadas por GTAW	43
Figura 3.2 - Liga Stellite 6 aplicada por diferentes processos de soldagem (a) deposição de três camadas por GTAW, (b) deposição de três camadas por Oxiacetileno, (c) deposição de três camadas por Eletrodo Revestido	43
Figura 3.3 - Representação esquemática de revestimento pelo processo Oxi-Gás..	45
Figura 3.4 - Representação esquemática da Soldagem ao Arco com Eletrodo Revestido	47
Figura 3.5 -Representação esquemática da soldagem SAMG.....	49
Figura 3.6 - Representação esquemática da Soldagem ao Arco Submerso	51
Figura 3.7 - Representação esquemática de uma tocha SATG, com alimentação automática de arame.....	54
Figura 3.8 - Representação esquemática da solda SATG, com alimentação manual de arame	54
Figura 3.9 - Representação esquemática de revestimento SATG, com utilização de pó metálico	55
Figura 3.10 - Representação esquemática do processo SAP	59
Figura 3.11 - Representação esquemática do processo PAT-P e PAT-A	60
Figura 3.12 - Representação esquemática de um bocal coaxial, de alimentação de pó utilizado em revestimento a LASER	64
Figura 3.13 - Processo Híbrido MIG-LASER.....	65
Figura 3.14 - Desenho esquemático de uma tocha para soldagem Plasma-MIG - processo patenteado por W. G. Essers, em 1980.....	65
Figura 3.15 - Configuração do bico constritor de injeção externa de pó – ângulo de inclinação dos canais injetores - 30° e 60°	67
Figura 3.16 - Representação esquemática de um bico constritor, com 1 canal de alimentação	68
Figura 3.17 - Bico constritor e canais de injeção externa de pó.....	68
Figura 3.18 - Modelo de bico injetor com alimentação interna de pó	69
Figura 3.19 - Trajetória das partículas com o ângulo. V_{p0} = Velocidade das partículas, no ponto de injeção.....	69
Figura 4.1 - Representação esquemática de soldagem SATG, com alimentação automática de pó metálico, à frente da solda	75
Figura 4.2 - Representação esquemática de um conjunto bocal/bico de alimentação de pó de uma tocha PAT-P	76
Figura 4.3 - Representação esquemática de um conjunto bocal/bico de alimentação de pó de uma tocha SATG-P	77

Figura 4.4 - Desenho do bico direcionador com 4 furos concêntricos	78
Figura 4.5 - a) Simulação de fluxo da liga, no protótipo 3 e b) visualização da malha de simulação do caminho percorrido pela liga.....	80
Figura 4.6 - Visualização do fluxo da liga, na saída do dispositivo	81
Figura 4.7 - Desenho do bico direcionador, com 8 furos concêntricos	82
Figura 4.8 - Desenho do protótipo 3 e dispositivo em 3D – software Solid Works....	83
Figura 4.9 - Desenho em vista explodida, do protótipo 3 e dispositivo de adaptação	84
Figura 4. 10 - Desenho em corte total do dispositivo, juntamente, com o protótipo 3	85
Figura 4.11 - Foto do alimentador de pó ADP 2	88
Figura 4.12 - Representação esquemática do deslocamento da tocha	89
Figura 4.13 - Representação esquemática do procedimento, para a determinação dos perfis de microdureza.....	91
Figura 4.14 - Método da medição de diluição por penetração	93
Figura 4.15 - Representação esquemática do abrasômetro Roda de Borracha.	95
Figura 5.1 - Foto de uma das configurações do protótipo 1.....	97
Figura 5.2 - Foto dos cordões de solda SATG, com alimentação à frente do arco... 97	
Figura 5.3 - Foto do bico, com 4 furos concêntricos – a) vista lateral, b) vista inferior	98
Figura 5.4 - Estado do eletrodo e bico, após o teste de deposição - Configuração do bocal/bico direcionador, com 4 furos concêntricos	99
Figura 5.5 - Resultado do revestimento da configuração bocal/bico direcionador, com 4 furos concêntricos.....	99
Figura 5.6 - Configuração do bocal/bico direcionador com 8 furos concêntricos....	100
Figura 5.7 - Foto da superfície do depósito pelo protótipo 3.....	100
Figura 5.8 - Foto do depósito pelo protótipo 3, corte transversal, ataque Nital 4%. 101	
Figura 5.9 - Foto da vista inferior do protótipo 3, após teste de deposição.....	101
Figura 5.10 - Foto do dispositivo, logo após o funcionamento, configuração com 8 furos concêntricos, adaptado à tocha SATG - deposição automática	102
Figura 5.11 - Foto de alta velocidade da deposição de pó, pelo processo SATG-pó automático	103
Figura 5.12 - Fotos dos cordões depositados (vista da superfície) - SATG–Pó automático e semi-automático e PAT-P.....	104
Figura 5.13 - Fotomacrografia dos revestimentos – corte transversal	105
Figura 5.14 - Detalhe da falta de fusão, revestimento SATG automático – A5.....	105
Figura 5.15 - Fotomicrografias do Revestimento SATG-Pó automático - A1– (a) próximo à interface e (b) próximo à superfície – A5 – (c) próximo à interface e (d) próximo à superfície.....	106

Figura 5.16 - Fotomicrografias do Revestimento SATG-Pó semi-automático – A1 – (a) próximo à interface e (b) próximo à superfície - A5 – (c) próximo à interface e (d) próximo à superfície	107
Figura 5.17 - Fotomicrografias do Revestimento PAT-P A1– (a) próximo à interface (b) próximo à superfície – A5 – (c) próximo à interface e (d) próximo à superfície .	107
Figura 5.18 - MEV do revestimento por STAG-Pó semi-automático - A1 – 9,5 g/min – Próximo à superfície do revestimento e respectivos EDS, das regiões A e B.....	109
Figura 5.19 - MEV do revestimento por STAG-Pó semi-automático - A1 – 9,5 g/min - próximo à interface do revestimento e respectivos EDS, das regiões A e B.....	110
Figura 5. 20 - MEV do revestimento por STAG-Pó semi-automático - A5 – 19 g/min - próximo à superfície do revestimento e respectivos EDS, das regiões A e B.....	111
Figura 5.21 - MEV do revestimento por STAG-Pó semi-automático - A5 – 19 g/min - próximo à interface do revestimento e respectivos EDS, das regiões A e B.....	112
Figura 5.22 - MEV do revestimento por STAG-Pó automático - A1 – 9,5 g/min - próximo à superfície do revestimento e respectivos EDS, das regiões A e B.....	113
Figura 5.23 - MEV do revestimento por STAG-Pó automático - A1 – 9,5 g/min - próximo à interface do revestimento e respectivos EDS, das regiões A e B.....	114
Figura 5.24 - MEV do revestimento por STAG-Pó automático – A5 – 19 g/min - próximo à superfície do revestimento e respectivos EDS, das regiões A e B.....	115
Figura 5.25 - MEV do revestimento por STAG-Pó automático – A5 – 19 g/min - próximo à interface do revestimento e respectivos EDS, das regiões A e B.....	116
Figura 5.26 - MEV do revestimento por PAT-P - A1 – 9,5 g/min - próximo à superfície do revestimento e respectivos EDS, das regiões A e B	117
Figura 5.27 - MEV do revestimento por PAT-P - A1 – 9,5 g/min - próximo à interface do revestimento e respectivos EDS, das regiões A e B	118
Figura 5.28 - MEV do revestimento por PAT-P - A5 – 19 g/min - próximo à superfície do revestimento e respectivos EDS, das regiões A e B	119
Figura 5.29 - MEV do revestimento por PAT-P - A5 – 19 g/min - próximo à interface do revestimento e respectivos EDS, das regiões A e B	120
Figura 5.30 - Difratoograma SATG-P automático – deposição 9,5 g/min.....	127
Figura 5.31 - Difratoograma SATG-P semi-automático – deposição 9,5 g/min	127
Figura 5.32 - Difratoograma PAT-P – deposição 9,5 g/min.....	122
Figura 5.33 - Difratoograma SATG-P automático – deposição 19 g/min.....	123
Figura 5.34 - Difratoograma SATG-P semi-automático – deposição 19 g/min.....	124
Figura 5.35 - Difratoograma PAT-P – deposição 19 g/min.....	124
Figura 5.36 - Perfis de microdurezas, para deposição de 9,5 g/min – amostras A1.	127
Figura 5.37 - Perfis de microdurezas, para deposição de 19 g/min – Amostras A5.	1247
Figura 5.38 - Perda de volume, para o ensaio de desgaste, na condição de deposição de 9,5 g/min	129

Figura 5.39 - Perda de volume, para o ensaio de desgaste, na condição de deposição de 19 g/min.....	129
Figura 5.40 - Foto da superfície desgastada SATG semi-automático (a) – deposição 9,5 g/min e (b) – deposição 19 g/min.....	130
Figura 5.41 - – Foto da superfície desgastada SATG automático (a) – deposição 9,5 g/min e (b) – deposição 19 g/min.....	131
Figura 5.42 - Foto da superfície desgastada PAT-P (a) – deposição 9,5 g/min e (b) – deposição 19 g/min.....	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Classificação dos materiais para revestimento duro, em função da composição química.....	38
Tabela 3.2 - Classificação dos materiais para revestimento duro, em função do teor de elementos de liga	39
Tabela 3.3 - Materiais para revestimento duro, em função do teor de elementos de liga e aplicação.....	41
Tabela 3.4 - Composição nominal das ligas Stellite 1, 6, 12 e 21	44
Tabela 3.5 Comparação atual entre os processos SATG e PAT-P aplicados em revestimentos	71
Tabela 4.1 - Parâmetros de soldagem para o protótipo 1	76
Tabela 4.2 - Parâmetros de soldagem para o protótipo 2	79
Tabela 4.3 - Parâmetros de soldagem utilizados para testes do protótipo 3.....	82
Tabela 4.4 - Descrição, material e massa dos componentes, do protótipo 3 e dispositivo de adaptação à tocha SATG	84
Tabela 4.5 - Valores dos parâmetros de soldagem, para a determinação da vazão ideal de gás de proteção	86
Tabela 4.6 - Valores dos parâmetros utilizados, para a determinação da vazão mínima do gás de arraste e taxa de alimentação de pó.....	87
Tabela 4.7 - Composição nominal do substrato SAE 1020 e da liga Stellite 6.....	87
Tabela 4.8 - Parâmetros utilizados para realização dos revestimentos	90
Tabela 4.9 - Parâmetros de teste, para ensaio de desgaste.....	95
Tabela 5.1 - Composição química, detectada pela análise EDS, das regiões A e B, da deposição por SATG – amostra TA1 – 9,5 g/min próximo à superfície.....	109
Tabela 5.2 - Composição química, detectada pela análise EDS, das regiões A e B, da deposição por SATG – amostra TA1 – 9,5 g/min próximo à interface.....	110
Tabela 5.3 - Composição química, detectada pela análise EDS, das regiões A e B, da deposição por SATG – amostra TA5 – 19 g/min próximo à superfície.....	111
Tabela 5.4 - Composição química, detectada pela análise EDS, das regiões A e B, da deposição por SATG – amostra TA5 – 19 g/min próximo à interface.....	112
Tabela 5.5 - Composição química, detectada pela análise EDS, das regiões A e B, da deposição por SATG – amostra TM1 – 9,5 g/min próximo à superfície	113
Tabela 5.6 - Composição química, detectada pela análise EDS, das regiões A e B, da deposição por SATG – amostra TM1 – 9,5 g/min próximo à interface	114
Tabela 5.7 - Composição química, detectada pela análise EDS, das regiões A e B, da deposição por SATG – amostra TM5 – 19 g/min próximo à superfície	115
Tabela 5.8 - Composição química, detectada pela análise EDS, das regiões A e B, da deposição por SATG – amostra TM5 – 19 g/min próximo à interface	116

Tabela 5.9 - Composição química, detectada pela análise EDS, das regiões A e B, da deposição por PAT-P – amostra P1 – 9,5 g/min próximo à superfície.....	117
Tabela 5.10 - Composição química, detectada pela análise EDS, das regiões A e B, da deposição por PAT-P – amostra P1 – 9,5 g/min próximo à interface	118
Tabela 5.11 - Composição química, detectada pela análise EDS, das regiões A e B, da deposição por PAT-P – amostra P5 – 19 g/min próximo à superfície.....	119
Tabela 5.12 - Composição química, detectada pela análise EDS, das regiões A e B, da deposição por PAT-P – amostra P5 – 19 g/min próximo à interface	120
Tabela 5.13 - Resultados referentes à diluição e rendimento da deposição.....	125

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agencia Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
CFC	Estrutura Cúbica de Face Centrada
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition</i>
ESAB	<i>Elektriska Svetsnings Aktie Bolaget</i>
EUA	Estados Unidos da América
FCAW	<i>Flux Cored Arc Welding</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
HRC	<i>Hardness Rockwell na escala C</i>
HV	<i>Hardness Vickers</i>
LBW	<i>Laser Beam Welding</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MIG/MAG	<i>Metal Inert Gas / Metal Active Gas</i>
MO	Microscopia Óptica
NBR	Norma Brasileira
PAW	<i>Plasma Arc Welding</i>
PAT-A	Plasma de Arco Transferido alimentado com Arame
PAT-P	Plasma de Arco Transferido alimentado por Pó
PIB	Produto Interno Bruto
PTA	<i>Plasma Transferred Arc</i>
PTA-W	<i>Plasma Transferred Arc - Wire</i>
PTA-P	<i>Plasma Transferred Arc – Powder</i>
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SAER	Soldagem ao Arco com Eletrodo Revestido
SAMG	Soldagem a Arco Metálico com Atmosfera Gasosa
SAP	Soldagem ao Arco Plasma
SAS	Soldagem ao Arco Submerso
SAT	Soldagem ao Arco com Arame Tubular

SATG	Soldagem ao Arco Tungstênio com Atmosfera Gasosa
SAW	<i>Submerged Arc Welding</i>
SL	Soldagem por Laser
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UV	Ultra violeta
ZTA	Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	29
1.1 Estudo de mercado.....	29
1.2 Análise da necessidade de pesquisa em revestimento duro.....	30
2 OBJETIVOS.....	33
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	35
3.1 Desgaste.....	35
3.1.1 Introdução ao desgaste.....	35
3.1.2 Classificação dos tipos de desgaste.....	36
3.2 Revestimentos duros resistentes ao desgaste.....	37
3.2.1 Materiais para revestimentos duros.....	38
3.2.2 Ligas a base de Cobalto.....	41
3.3 Processos de soldagem aplicados para revestimento duro.....	44
3.3.1 Processo de Soldagem Oxi-gás (SOG).....	44
3.3.2 Processo de Soldagem ao Arco com Eletrodo Revestido (SAER).....	46
3.3.3 Processo de Soldagem ao Arco Metálico com Atmosfera Gasosa (SAMG).	48
3.3.4 Processo de Soldagem ao Arco Submerso (SAS).....	51
3.3.5 Processo Soldagem Arco Tungstênio com Atmosfera Gasosa (SATG).....	53
3.3.5.1 Aplicações do Processo SATG em revestimentos duros.....	56
3.3.6 Processo de Soldagem ao Arco Plasma (SAP).....	58
3.3.6.1 Aplicações do Processo PAT-P em revestimentos duros.....	61
3.3.7 Processo de Soldagem por Laser (SL).....	63
3.3.8 Processos Híbridos de Soldagem.....	64
3.4 Modelos de tochas e bicos injetores do processo PAT-P.....	65
3.5 Comparação atual entre os processos SATG e PAT-P.....	70
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	73
4.1 Desenvolvimento do Dispositivo.....	73
4.1.1 Protótipo 1.....	74
4.1.2 Protótipo 2.....	76
4.1.3 Protótipo 3.....	79
4.2 Adaptação à tocha SATG.....	83

4.3 Calibração do equipamento.....	85
4.3.1 Vazão ideal do gás de proteção.....	86
4.3.2 Vazão ideal de gás de arraste e taxa de alimentação de pó metálico.....	86
4.4 . Preparação dos substratos para o revestimento.....	87
4.5 Deposição dos revestimentos.....	88
4.6 Caracterização dos revestimentos.....	90
4.6.1 Inspeção Visual.....	90
4.6.2 Perfis de Microdureza.....	91
4.6.3 Preparação Metalográfica.....	92
4.6.4 Determinação da Diluição.....	93
4.6.5 Determinação do rendimento da deposição.....	94
4.6.6 Ensaio de desgaste tipo Roda de Borracha.....	94
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	97
5.1 Resultados preliminares protótipo 1.....	97
5.2 Resultados preliminares protótipo 2.....	98
5.3 Resultados preliminares protótipo 3.....	99
5.4 Resultados finais e discussão.....	102
5.4.1 Protótipo 3 adaptado à tocha SATG.....	102
5.4.2 Análise Visual.....	103
5.4.3 Análise Microestrutural.....	106
5.4.3.1 Microscopia Óptica.....	106
5.4.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV.....	108
5.4.4 Difração de Raios-X.....	121
5.4.5 Diluição e rendimento da deposição	125
5.4.6 Aporte Térmico.....	125
5.4.7 Microdureza.....	126
5.4.8 Ensaio de desgaste abrasivo tipo roda de borracha.....	128
6 CONCLUSÕES.....	133
7 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	135
8 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	137

1. INTRODUÇÃO

1.1. Estudo de mercado

O setor metalúrgico há muito tempo vem se destacando, na economia brasileira. Entre 1970 e 2006, a participação da metalurgia situou entre 7 e 9% do PIB industrial e, na economia brasileira, sua contribuição oscilava em torno de 2%. O setor apresenta tradição exportadora, o que tem permitido contribuições expressivas à balança comercial do país. Destaca-se a importância do setor, para a economia brasileira, uma vez que é base para outras atividades econômicas relevantes para o país, como a indústria automobilística, de construção civil e de bens de capital. Em 2010, participou com 23,2% do saldo da balança comercial, 8,2% do PIB industrial e 2,2% no PIB nacional^{1,2}.

No Brasil, o pólo do setor metalúrgico encontra-se nos estados São Paulo e Minas Gerais, seguido por Santa Catarina. No mundo, alguns países que se destacam nesse setor são: Estados Unidos, China, Alemanha, Japão, Finlândia e os Países Baixos.

De acordo com o Plano de Negócios 2010-2014 da Petrobras, divulgado em 2010, a empresa previa investimentos de US\$ 224 bilhões, representando uma média de US\$ 44,8 bilhões, por ano. Deste total, 95% (US\$ 212,3 bilhões) representam aplicações no Brasil, e apenas 5% (US\$ 11,7 bilhões), no exterior. Mesmo que sofra alguma redução, por conta de cortes de verba do governo, ainda assim será uma significativa colocação de investimentos, no mercado fornecedor doméstico, com uma taxa de conteúdo local totalizando 67%, o que significa um nível de contratação anual, no país, de cerca de US\$ 28,4 bilhões^{3,4}. O setor de soldagem tem um papel especial nesse processo. Estima-se que o setor de soldagem receberá destaque, com pelo menos 20% dos investimentos anunciados pela Petrobras e, com isso, precisará buscar a inovação, em processos e produtos, além da certificação de empresas^{3,4}.

Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), as empresas instaladas no Brasil terão prioridade no fornecimento de bens e serviços, para as crescentes atividades de petróleo e gás, no País, com base na cláusula de conteúdo local. Neste caso, a demanda de investimentos para o pré-sal deverá superar US\$ 400 bilhões, em materiais, equipamentos, sistemas e serviços,

até 2020⁴. Considerando-se que os custos relacionados com a operação de soldagem⁵ (etapas de preparação, execução e inspeção) representem 5% do valor final de uma obra e, ao mesmo tempo, o montante previsto de US\$ 400 bilhões, a expectativa final é a de que o setor de soldagem movimente uma quantia de US\$ 20 bilhões, até 2020.

Com esta previsão de investimentos as empresas prestadoras de serviços para a Petrobras, deverão adequar-se às novas exigências do mercado no que diz respeito à inovação em materiais, produtos e processos industriais melhorando sua competitividade interna e externa. Além disso, deve ser considerado o parque industrial já instalado no Brasil, que de uma maneira geral são responsáveis também por grandes investimentos. Estas empresas têm suas atividades voltadas para o setor de produção de bens e serviços e são tão importantes para o desenvolvimento do país, quanto o setor ligado a ANP. Dentre as empresas que desenvolvem atividades relacionadas à soldagem, pode-se destacar as que produzem equipamentos e acessórios para soldagem, as que trabalham na recuperação de peças e equipamentos para os diversos setores da economia e nas que produzem materiais de consumo para o setor, que com certeza também terão seu mercado impulsionado com os investimentos ora anunciados pela Petrobras.

1.2. Análise da necessidade de pesquisa em revestimento duro

A necessidade do mercado mundial, por materiais que apresentem melhores propriedades físicas e mecânicas, para as aplicações mais severas, vem se tornando cada vez maior. Em função desta demanda, as empresas de alta tecnologia estão investindo em pesquisas, tanto no sentido de otimizar os materiais já existentes, como também, na inovação, em termos de processos de fabricação.

Praticamente, todos os setores industriais sofrem com os efeitos dos diversos mecanismos de desgaste, nas superfícies das peças. Normalmente, são solicitações localizadas, que degradam as peças, por intermédio de mecanismos de desgaste como: abrasão, adesão, cavitação, os quais podem também estar combinados com fenômenos químicos, como a corrosão.

Com o objetivo de aumentar a vida útil das peças e reduzir os custos, com troca das mesmas, são realizados reparos periódicos, com revestimentos de

soldagem, nas áreas mais desgastadas. Esses reparos devem ser de alta qualidade, para que garantam a vida útil da peça e, conseqüentemente, o tempo entre as operações de manutenção.

A pesquisa de novos materiais e processos de fabricação, na área de revestimento superficial, por soldagem, tem procurado soluções para minorar este problema. Tem-se buscado a aplicação de ligas metálicas e até materiais compostos, sobre o substrato, para a formação de carbetos, nitretos, óxidos, dentre outros, para aumentar a resistência ao desgaste.

Os revestimentos superficiais diferem de tratamentos superficiais, que adicionam pouca ou quase nenhuma massa à superfície (filmes finos). Revestimentos são considerados espessos, e são aplicados por diversos métodos: deposição química de vapor (CVD – *chemical vapor deposition*), deposição física de vapor (PVD – *physical vapor deposition*), eletrodeposição, soldagem, cladeamento (*cladding*) e aspersão térmica (*thermal spray*)⁶.

A seleção do tipo de revestimento e da liga a ser depositada depende de vários fatores, como: as condições de operação, as características do metal de base, a relação custo/benefício e o custo de processamento. A soldagem, que é uma das técnicas utilizadas, para o revestimento metálico, tem por principal finalidade controlar a corrosão e melhorar a resistência ao desgaste. Os processos de soldagem de revestimentos mais utilizados são: Chama Oxiacetilênica, Eletrodo Revestido, SAMG (Soldagem ao Arco Metálico com Proteção Gasosa), Arco Submerso, SATG (Soldagem ao Arco Tungstênio com Atmosfera Gasosa), Soldagem por Explosão, LASER, Plasma por Arco Transferido (PAT) e Soldagem por Explosão⁷.

2. OBJETIVOS

Atualmente, para obtenção de revestimentos duros, pelo processo de soldagem SATG, são utilizados materiais de deposição em forma de arame ou vareta, os quais proporcionam revestimentos com alta taxa de diluição, e uma taxa de deposição relativamente baixa se comparada à outros processos. Tais fatores tornam o processo SATG pouco atraente para deposição de revestimento duro de qualidade.

Já o processo PAT-P (Plasma de Arco Transferido-Pó), possibilita a realização de revestimentos duros com baixa taxa de diluição e alta taxa de deposição, o que permite, ao revestimento, propriedades metalúrgicas e mecânicas próximas às da liga depositada. Este processo permite ainda a utilização de material de adição em forma de arame, vareta e pó, viabilizando neste ultimo caso, a deposição de ligas com composição química variada, ou seja, diferente das encontradas comercialmente.

Pretende-se, com este trabalho, propor uma inovação do processo de soldagem SATG, visando a deposição de revestimentos duros, com sensível melhora da taxa de deposição e diminuição da diluição.

Para tanto, tem-se como objetivo principal o desenvolvimento de um dispositivo que adaptado a qualquer tocha de soldagem SATG, permita a obtenção de revestimentos duros, por meio da deposição de ligas na forma de pó diretamente na poça de fusão.

Obter ainda revestimentos com características metalúrgicas e mecânicas similares às do processo PAT-P.

Pretende-se também, que esta inovação possa ser utilizada por empresas, de pequeno e médio porte, prestadoras de serviços na área de manutenção de equipamentos e as fabricantes de equipamentos e dispositivos para área de soldagem a um custo acessível e de fácil implementação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Desgaste

3.1.1. Introdução ao desgaste

A literatura apresenta várias definições de desgaste, com algumas diferenças no modo de descrever, mas apresentando o mesmo conceito final. O fenômeno de desgaste pode ser definido como a deterioração, não intencional, de um material, resultante do uso ou da interação com o meio ambiente. Mais especificamente, pode-se usar a palavra desgaste, para indicar a remoção de partículas metálicas, que resulta do movimento relativo, entre dois materiais, geralmente, sob carga, ou ainda à *“mudança cumulativa e indesejável em dimensões motivada pela remoção gradual de partículas discretas de superfícies em contato e com movimento relativo, devido, predominantemente, a ações mecânicas”*⁸.

O desgaste de componentes e equipamentos industriais, agrícolas, petrolíferos e outros, que geram custos e despesas com a manutenção ou reposição representa um fator importante, na queda de rendimento da produção. Isto ocorre quando há a necessidade de uma simples reposição de peças ou, até mesmo, a troca de todo o equipamento⁹.

No caso do desgaste localizar-se apenas em determinada peça, que poderá ser reparada com a simples remoção da superfície deteriorada, a solda de revestimento tem se mostrado uma solução eficaz, para este problema que, além de recuperar a peça danificada, poderá, ainda, atuar como prevenção ao desgaste, além da vantagem de seu custo não ser muito relevante, no resultado final, dependendo da liga e processo utilizado.

Geralmente, peças e equipamentos são fabricados com materiais convencionais, mas dependendo da utilização de determinada peça e, conseqüentemente, o desgaste a que ela estará sujeita, tais peças podem ser revestidas com camadas ou cordões de solda especiais, para que possam resistir a estes desgastes⁹.

São muitos os fatores que podem influenciar no desgaste de peças e equipamentos como, por exemplo: o emprego desta peça ou equipamento, a

exigência a que são submetidos e o tipo de abrasivo, aliados às propriedades do material.

Várias pesquisas^{9,10,13} vêm sendo realizadas na identificação e correlação entre os fatores que influenciam na resistência ao desgaste, trabalhos estes concentrados nas características microestruturais, diluição do cordão de solda, relação dureza x desgaste, e parâmetros do processo, quando se trata de revestimentos por soldagem.

3.1.2. Classificação dos tipos de desgaste

A classificação dos tipos de desgaste encontrada na literatura apresenta certa dificuldade, na unanimidade dos conceitos, devido à complexidade dos fatores envolvidos no desgaste. Há divergências entre os tipos e seus efeitos, onde é relatado que um tipo de desgaste pode mudar para outro ou ainda dois tipos operarem em conjunto. Devido a essa complexidade, tem-se procurado classificá-los com o objetivo de facilitar o estudo do fenômeno e a sua prevenção.^{1 apud 10}

Para maior facilidade de análise e prevenção, procura-se geralmente identificar o(s) mecanismo(s) predominante(s) de remoção de material. Para tanto, os tipos gerais de desgaste podem ser classificados como:^{8,9,11,12,13}

- a) Desgaste por Abrasão – é um fenômeno que ocorre quando partículas duras abrasivas deslizam ou são forçadas contra uma superfície, em relação à qual estão em movimento, provocando, por deslocamento ou amassamento, a perda de massa das peças.
- b) Desgaste por Adesão – resultante do atrito metal - metal, quando superfícies ásperas deslizam entre si;
- c) Desgaste por Erosão – ocorre devido ao choque contra a superfície, de partículas sólidas ou gotas líquidas, presentes em correntes de fluidos;
- d) Desgaste Corrosivo – que envolve a ocorrência de reações químicas superficiais no material, além das ações mecânicas de desgaste;
- e) Desgaste por Cavitação – está associado à formação e implosão de bolhas gasosas, em correntes de fluidos, na interface líquido-metal, devido à variação súbita de pressão, ao longo do percurso;

¹ Eyre, T. S. Friction and Wear Mechanisms. ABM. II Seminário sobre Materiais Resistentes ao Desgaste. Uberlândia – MG. P. 263-306, dez. 1991.

f) Desgaste por impacto – ocasionado por choques ou cargas aplicadas, verticalmente, sobre a superfície.

Um fato importante, que poderia direcionar a concentração das pesquisas ou trabalhos, com o objetivo de minimizar os efeitos produzidos pela ação do desgaste, tem relação direta com a frequência de ocorrência do tipo de desgaste, nos ambientes industriais.

Em ambientes industriais, de uma forma geral, o desgaste e respectiva porcentagem de ocorrência podem-se apresentar como: abrasão (50%), adesão (15%), erosão (8%), fricção (8%) e corrosão (5%). Compreende-se, também, que a resistência à solicitação de desgaste não é propriedade intrínseca de um material, mas sim, característica do sistema ou do equipamento ao qual o componente está ligado mecanicamente e do seu meio operacional² apud 10.

Nota-se que a classificação utilizada na citação acima difere um pouco das definições apresentadas.

3.2. Revestimentos duros resistentes ao desgaste

Revestimento duro é o processo caracterizado pela produção de uma camada dura e resistente ao desgaste, na superfície de uma peça, por meio da soldagem. O material de deposição pode ser na forma de varetas, arames ou pós, com composição química adequada, para atender às necessidades da solicitação. Os processos de soldagem utilizados são: a Soldagem Oxi-gás e os Processos a Arco Elétrico⁹.

Os revestimentos produzidos pela Soldagem Oxi-gás apresentam-se mais uniformes, podendo ser melhor posicionados, na peça, quando da execução manual, com velocidades de aquecimento e resfriamento, relativamente baixas. Por outro lado, a soldagem a arco é um processo menos caro, se considerada a taxa e velocidade de deposição e se presta melhor à utilização de equipamentos automáticos. Com a utilização de parâmetros adequados ao tipo de revestimento, as características dos depósitos obtidos com arco elétrico podem apresentar um melhor acabamento superficial, reduzindo a tendência na formação de porosidades, bem

² Eyre, T. S. Friction and Wear Mechanisms. ABM. **II Seminário sobre Materiais Resistentes ao Desgaste. Uberlândia** – MG. P. 263-306, dez. 1991.

como reduzir os efeitos dos gradientes de temperatura, para evitar o surgimento de trincas⁹.

Durante a soldagem, o material depositado é fundido, juntamente com o material base, ocorrendo, portanto, alguma diluição deste último no material de adição e produzindo a camada do revestimento, com altura controlada pela taxa de deposição. Considera-se um bom revestimento, quando a diluição do substrato é mínima, ou seja, apenas o suficiente para produzir a ligação metalúrgica, entre o revestimento e o substrato, mantendo assim, as propriedades de resistência ao desgaste da liga depositada⁹.

3.2.1 Materiais para revestimentos duros

Os materiais utilizados para revestimento duro são fornecidos na forma de varetas, arames ou pós, com composição química adequada à necessidade. O material depositado é fundido durante a soldagem, espalhando-se sobre a superfície do substrato, em camadas com espessuras que variam entre 1,5 mm a 6,0 mm, dependendo do processo e da capacidade do equipamento utilizado⁹.

“Não existe ainda uma classificação de metal de adição que envolva a maioria das ligas utilizadas para revestimento duro. As classificações existentes são baseadas na composição química do metal de adição depositado sem nenhuma diluição, como nas normas ASME A5.13-80 e SFA A5.21-80.”¹¹

A Tabela 3.1 apresenta uma classificação dos materiais para recobrimento duro, divididos em cinco grandes classes, em função da composição química^{3 apud 11}.

Tabela 3.1 - Classificação dos materiais para revestimento duro, em função da composição química

Denominação	
Classe 1	Aços baixa e média liga com 2 a 12% de elementos de liga
Classe 2	Aços alta liga, incluindo os aços rápidos e aços ao manganês
Classe 3	Ligas à base de ferro com 25 a 50% de elementos de liga
Classe 4	Ligas à base de cobalto, níquel e níquel-cromo
Classe 5	Ligas com dispersões de carbonetos de tungstênio, entre 38 a 60% em matriz de liga dúctil

Adaptado de 11

3 Spencer, L. F. Hardfacing – picking the proper alloy; weld Eng., nov. 1970, p.39-48

Outra classificação apresentada na Tabela 3.2, coloca os materiais para aplicação em revestimento, em cinco grandes grupos, considerando o teor total de elementos de liga⁹.

Tabela 3.2 - Classificação dos materiais para revestimento duro, em função do teor de elementos de liga

Teor total de elementos de liga %		Elementos de liga principais
Materiais ferrosos de baixa liga		
1A	2 a 6	Cr, Mo, Mn
1B	6 a 12	
Materiais ferrosos de alta liga		
2A	12 a 15	Cr, Mo
2B	12 a 25	Mo, Cr
2C	12 a 25	Mn, Ni
2D	30 a 37	Mn, Cr, Ni
3A	25 a 50	Cr, Ni, Mo
3B	25 a 50	Cr, Mo
3C	25 a 50	Co, Cr
Ligas à base de níquel e à base de cobalto		
4A	50 a 100	Co, Cr, W
4B	50 a 100	Ni, Cr, Mo
4C	50 a 100	Cr, Ni, Mo
Carbonetos		WC ou WC em combinação com outros carbonetos, como TiC e TaC, sempre em uma matriz metálica
5	75 a 96	

Adaptado de 9

Em geral, a escolha de uma liga específica depende da composição do metal base, do tipo de desgaste que age sobre a peça, da condição da superfície, da compatibilidade metalúrgica e do processo adequado, para a aplicação do revestimento¹¹. A resistência ao desgaste e o custo crescem com o número do grupo⁹, conforme a tabela 3.2.

As ligas do grupo 1A são aços de baixo teor de liga, quase sempre tendo o cromo como principal elemento. São empregadas, frequentemente, como uma camada de base, para um recobrimento duro, com ligas de teor de liga mais elevado.

As ligas ferrosas do subgrupo 1B são semelhantes às do grupo 1A; muitos aços ferramenta e alguns aços ligados fazem parte deste grupo. São mais baratas que as outras ligas de recobrimento duro e muito empregadas nos

casos em que se necessita da usinabilidade e de apenas um aumento moderado da resistência ao desgaste.

As ligas dos subgrupos 2A e 2B são mais resistentes ao desgaste, menos tenazes e mais caras que os materiais do grupo 1. Já os subgrupos 2C e 2D são muito tenazes, porém, apresentam limitada resistência ao desgaste, que pode ser muito aumentada, pelo encruamento.

Os materiais do grupo 3 são caracterizados pela presença maciça de carbonetos hipereutéticos, que conferem às ligas uma alta resistência ao desgaste e uma razoável resistência à corrosão e ao calor. São ligas mais caras que as dos grupos 1 e 2.

As ligas à base de cobalto, subgrupo 4A, são consideradas como os mais versáteis materiais de revestimento duro. Resistem ao calor, à abrasão, à corrosão, ao impacto, à descamação, à oxidação, ao choque térmico, à erosão e ao desgaste metal-metal.

Algumas destas ligas mantêm uma dureza elevada até 825°C e resistem à oxidação, até temperaturas da ordem 1100°C. As ligas à base de níquel, subgrupo 4B, são especialmente indicadas para peças sujeitas ao mesmo tempo à corrosão e ao desgaste. São superiores a outros materiais de revestimento duro em aplicações, nas quais o desgaste é causado pelo contacto metal-metal, como no caso de mancais. Mantém durezas elevadas até cerca de 650°C e resistem à oxidação, até temperaturas da ordem de 875°C.

Os materiais do grupo 5 são muito indicados para aplicações de abrasão intensa e de corte. Inicialmente se empregavam apenas os carbonetos de tungstênio. Mais recentemente, outros carbonetos, principalmente titânio, tântalo e cromo, passaram a ser usados com bons resultados. Como matriz metálica, vários materiais tem sido utilizados, tais como ferro, aço-carbono, ligas à base de níquel, à base de cobalto e bronzes. Os materiais do grupo 5 possuem a máxima resistência à abrasão, em peças sujeitas a impactos pequenos ou moderados⁹.

Em recente revisão bibliográfica sobre o assunto¹⁴, foi apresentada uma classificação dividindo os materiais para revestimento em 4 categorias, aplicando também, os mesmos critérios quanto à porcentagem dos elementos de liga, na composição química. A Tabela 3.3 apresenta essa divisão, considerando em alguns casos, suas aplicações.

Tabela 3.3 - Materiais para revestimento duro, em função do teor de elementos de liga e aplicação

Categoria	Teor total de elementos de liga %
Materiais ferrosos de baixa liga	Até 12% de elementos de liga Cr, Mo e Mn
Materiais ferrosos de alta liga	De 12 à 50% de elementos de liga adicionados ao Cr sempre presente nas ligas utilizadas para revestimento duro. Dentre as ligas pode-se citar Ni e Co
Ligas à base de níquel e à base de cobalto	Apresenta quantidades relativamente pequenas de ferro (1,3 a 12,5%) variando a quantidade de Cr e W. Apresenta elevada resistência a corrosão e oxidação, baixo coeficiente de atrito. Aplicadas em condições de elevadas temperaturas – em torno de 500 °C ou mais
Ligas à base de Carbonetos de Tungstênio	Considerado um dos materiais mais duros disponíveis para uso industrial com aplicações em revestimento duro.

Adaptado de 14

Comparando as Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3 verifica-se que as divisões apresentados são as mesmas. Em relação à quantidade de elementos de ligas, a Tabela 3.2 é mais esclarecedora, cabendo aí uma análise da necessidade da aplicação e dos processos disponíveis, para uma seleção mais adequada da liga.

3.2.2. Ligas a base de Cobalto

De acordo com a informação acima, as ligas à base de cobalto pertencem ao sub-grupo 4A, Tabela 3.2, e se destacam por sua versatilidade, na aplicação em revestimento duro, uma vez que, apresentam ótimos resultados quanto à resistência ao calor, abrasão, corrosão, impacto, entre outros.

Dentre as ligas à base de cobalto destaca-se a liga Stellite 6, como é conhecida comercialmente, cujo comportamento em revestimento duro, vem sendo estudado por pesquisadores, tanto na sua forma pura, como com a adição de outros elementos^{15,16}, como por exemplo: carbonetos, na tentativa de formação de fases duras, bem como na variação dos parâmetros de processo, com consequência direta, na sua microestrutura¹⁷.

De acordo com o ASM Handbook¹⁶, Elwood Haynes registrou em 1907 a primeira patente da liga, à base de cobalto, constituída, principalmente, dos ternários Cobalto-Cromo-Tungstênio e Cobalto-Cromo-Molibdênio, servindo até hoje como

base, para a maioria das ligas à base de cobalto. O nome Stellite foi originado do latim Stella (estrela), por apresentar um brilho semelhante ao de uma estrela.

Atualmente, existem aproximadamente 60 ligas do tipo quaternárias, pertencentes à família Stellite, tendo como elementos principais: Cobalto-Cromo-Tungstênio-Carbono e Cobalto-Cromo-Molibdênio-Carbono.

De uma maneira geral, a composição de Cromo varia entre 19 e 35%, Tungstênio, que é encontrado em 72% das ligas, apresenta uma fração global entre 0,5 e 19% e Molibdênio varia entre 0,25 e 18%, aparecendo em 58% das ligas^{15,7}. Já o Carbono varia entre 0,1 e 3,3%, sendo responsável direto pela formação de carbonetos; da variação em sua porcentagem é que resulta, principalmente, a fração volumétrica de carbonetos, a dureza e a resistência à abrasão.^{15,18}

As microestruturas dessas ligas apresentam um número variado de carbonetos, do tipo $M_{23}C_6$, M_7C_3 e M_6C . O surgimento desses carbonetos está vinculado ao tipo da liga, se Cobalto-Cromo-Tungstênio/Molibdênio-Carbono, bem como com os teores desses elementos e da quantidade de carbono adicionada. A liga Stellite 6 por exemplo, com carbono na ordem de 1%, em peso, pode apresentar 13% de carbonetos, em peso de material¹⁶.

O tamanho e a forma das partículas de carbonetos, dentro das ligas de Stellite são fortemente influenciados pela taxa de resfriamento e pelas mudanças químicas sutis. Por exemplo, as Figuras 3.1 e 3.2 apresentam microestruturas típicas de algumas ligas da família Stellite, com sobreposição aplicada por diferentes processos de soldagem. Tais alterações afetam, significativamente, a resistência à abrasão, uma vez que há uma relação entre o tamanho das fases e tipos de abrasão, o tamanho e estrutura das partículas duras, e a taxa de desgaste abrasivo. A fração de carbonetos também é influenciada pela velocidade de resfriamento¹⁶.

Figura 3.1 - (a) Stellite 1, 2 camadas depositadas por GTAW (b) Stellite 6, 2 camadas depositadas por GTAW (c) Stellite 12, 2 camadas depositadas por GTAW ^{adaptado de¹⁶}

Figura 3.2 - Liga Stellite 6 aplicada por diferentes processos de soldagem (a) deposição de três camadas por GTAW, (b) deposição de três camadas por Oxiacetileno, (c) deposição de três camadas por Eletrodo Revestido ^{7,16}

A Tabela 3.4 apresenta a composição das ligas Stellite 1, 6, 12 e 21, analisadas em estudo de resistência ao desgaste ¹⁶. Neste estudo, foi verificado que a resistência ao desgaste está diretamente relacionada com o teor de carbono e tungstênio, pois à medida que se aumenta o teor destes dois componentes, resulta um maior surgimento de carbonetos e consequentemente, os efeitos deles na liga são evidentes, como por exemplo, o aumento da dureza, ocasionando uma maior resistência ao desgaste ⁷.

Tabela 3.4 - Composição nominal das ligas Stellite 1, 6, 12 e 21

ligas	Co	Cr	W	C	Ni	Fe	Si	Mn	Mo	Outros
Stellite 1	Bal.	31	12,5	2,4	Máx.3	Máx.3	Máx.2	Máx.1	Máx.1	...
Stellite 6	Bal.	28	4,5	1,2	Máx.3	Máx.3	Máx.2	Máx.1	Máx.1	...
Stellite 12	Bal.	30	8,3	1,4	Máx.3	Máx.3	Máx.2	Máx.1	Máx.1	...
Stellite 21	Bal.	28	...	0,25	2,5	Máx.2	Máx.2	Máx.1	5,5	...

Adaptado de 16

3.3 Processos de soldagem aplicados para revestimento duro

Neste Capítulo, é apresentada uma rápida abordagem dos processos de soldagem, que tem como uma de suas aplicações o revestimento duro de peças, sejam eles: Oxi-gás, Eletrodo Revestido, SAMG, Arco Submerso, LASER e Processos Híbridos de Soldagem. Os processos SATG, PAT-P serão abordados com mais ênfase, destacando suas vantagens e desvantagens, bem como as recentes pesquisas em aplicações de revestimento duro, fazendo uma comparação atual entre os dois processos.

3.3.1 Processo de Soldagem por Oxi-gás (SOG)

O processo de soldagem por Oxi-gás ou do inglês Oxy-fuel gas Welding (OFW) é um processo de soldagem por fusão, através da aplicação de calor, produzido por uma ou mais chamas, provocando a união entre os materiais. O calor gerado é produzido pela combustão de um gás combustível e oxigênio, misturados em proporções adequadas, para proporcionar a fusão do material base e material de adição, se for o caso. A American Welding Society (AWS)¹⁹ define este processo como sendo: “um grupo de processos onde o coalescimento é devido ao aquecimento produzido por uma chama, usando ou não metal de adição, com ou sem aplicação de pressão”.

Introduzido, industrialmente, em 1903, foi utilizado extensivamente durante meio século; no entanto, com o surgimento de métodos e processos com melhores resultados na qualidade da solda, seu uso diminuiu consideravelmente, mas ainda é largamente utilizado para união e reparo de componentes de metais ferrosos e não

ferrosos e como processo de revestimento, sendo utilizado com ligas à base de cobre e autofluxantes. Pode ser aplicado em metal base, tipo aço carbono de baixa liga, ferro fundido, cobre e alumínio²⁰. Não se recomenda para aços austeníticos ao manganês e nem inoxidáveis. Em muitos casos, este processo se presta para revestimentos em cantos, partes de pequenas espessuras, ou mesmo em locais onde se exige uma fina camada, sem destruir a região adjacente, além da facilidade de reconstruir cantos ou arestas¹¹.

A soldagem pelo processo oxi-gás oferece várias vantagens: o equipamento é barato e versátil, é ótimo para chapas finas, não usa energia elétrica¹². Em compensação, o processo apresenta várias desvantagens, tais como: requer maior tempo na operação, em virtude da dissipação térmica da chama, e com isto, se torna muito lento; como tem chamas pouco concentradas, o que acarreta grandes zonas termicamente afetadas pelo calor, é necessária grande habilidade do soldador; não é econômico, para chapas espessas; tem baixa taxa de deposição; exige manuseio de gases perigosos e o uso de fluxo acaba gerando produtos corrosivos, no metal^{11,20}.

A Figura 3.3 mostra o esquema de revestimento, utilizando pó metálico, através de uma tocha oxiacetilênica²¹. O pó é introduzido na corrente de gás acetileno, o qual se funde ao contato com a chama e, posteriormente, é direcionado para a poça de fusão. Com a adição de pó, a chama perde temperatura, diminuindo a capacidade de fundir o substrato, ocasionando uma menor diluição e menor distorção²¹.

Figura 3.3 - Representação esquemática de revestimento pelo processo Oxi-Gás²¹

3.3.2 Processos de Soldagem ao Arco com Eletrodo Revestido (SAER)

A primeira patente de soldagem, onde se utiliza o arco elétrico para soldar, por fusão, foi registrada em 1865, pelo inglês Wilde, quando uniu com sucesso duas peças de ferro, promovendo a passagem de uma corrente elétrica, através das mesmas^{20,22}.

Já a primeira patente de um processo de soldagem, em que um arco elétrico é estabelecido entre um eletrodo de carvão e a peça a ser soldada, provocando a fusão dos metais, ao mesmo tempo em que o arco era conduzido sobre a junta a ser soldada, foi registrada por volta de 1885, na Inglaterra, pelos pesquisadores Nikolas Bernardos e Stanislav Olszewsky^{20,22}.

Em 1890, dois outros pesquisadores, N.G. Slavianoff (Rússia) e Charles Coffin (EUA) desenvolveram, independentemente, a soldagem com eletrodo metálico nu, que era consumido durante a soldagem. Este processo em que o eletrodo tornava-se parte do metal de solda foi utilizado, durante alguns anos, até surgir a necessidade de soldas com melhor qualidade metalúrgica, pois neste processo ocorria a reação de nitrogênio e oxigênio, durante a soldagem, promovendo o surgimento de óxidos e nitretos, que são prejudiciais à solda. Para solucionar tal problema, os pesquisadores perceberam que o arco elétrico deveria ser protegido dos agentes atmosféricos e para tal seria necessário revestir o eletrodo, com algum material que, sob o calor do arco elétrico, proporcionaria uma proteção gasosa²².

Em 1904, Oscar Kjellberg, um engenheiro sueco, com o objetivo de melhorar a qualidade dos trabalhos de reparo em navios e caldeiras, revestiu um eletrodo com um material argiloso (cal), com a intenção de facilitar a abertura do arco elétrico, bem como aumentar sua estabilidade, dando origem à invenção do primeiro eletrodo revestido. Este mesmo engenheiro fundou a empresa ESAB e em 1908 patenteou o processo de soldagem a arco com eletrodo revestido^{22,23}. A Figura 3.4 representa esquematicamente a Soldagem ao Arco com Eletrodo Revestido (SAER) ou do inglês *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW)²². A AWS¹⁹ define como sendo “um processo de soldagem ao arco, onde a coalescência dos metais é produzida por calor, a partir de um arco elétrico, que é mantido entre a ponta de um eletrodo revestido e a superfície do metal de base, da junta a ser soldada”.

Figura 3.4 - Representação esquemática da Soldagem ao Arco com Eletrodo Revestido²²

Desde então, os avanços em busca da melhoria da qualidade do metal de solda não cessaram, culminando em meados dos anos 1920, com a produção do eletrodo revestido extrudado, propiciando o surgimento e desenvolvimento de novos processos de soldagem. Este processo ainda é um dos mais empregados nos dias de hoje, devido à sua versatilidade, baixo custo de operação e de equipamentos, bem como o uso em locais de difícil acesso ou sujeitos à interferência atmosférica, que impossibilitam o uso de outros processos.^{11,19,20,22}

A possibilidade de várias formulações para o revestimento explica a principal característica deste processo, que é sua grande versatilidade, em termos de ligas soldáveis, operacionalidade e características mecânicas e metalúrgicas, do metal depositado.

As desvantagens do processo, se comparado a outros processos que envolvem a soldagem com eletrodo consumível e proteção gasosa, são a baixa produtividade, os cuidados especiais, que são necessários no tratamento e manuseio dos eletrodos revestidos, treinamento e habilidade do soldador e o grande volume de gases e fumos, gerados durante a soldagem.^{11,19,20,22}

Não é usado para revestimentos de partes que exijam grandes volumes de depósitos, não só em virtude do alto custo, mas também, à grande dificuldade de

aquecer grandes massas e dificuldade em mecanizar e automatizar o processo. A alta diluição e penetração elevada são consideradas as principais desvantagens do processo, pois resulta em menores durezas e menores resistências ao desgaste⁷. Atualmente, utilizam-se eletrodos do tipo sintético, onde os elementos de liga são adicionados, através do revestimento. Em geral, para revestimentos, são eletrodos grossos e necessitam de boa habilidade de manuseio, principalmente, quanto à regulagem de amperagem, pois, se não for compatível com o diâmetro do eletrodo, deixa partículas de elementos, sem fundir na escória⁹.

3.3.3 Processo de Soldagem ao Arco Metálico com Atmosfera Gasosa (SAMG)

A Soldagem a Arco Metálico com Atmosfera Gasosa (SAMG) ou como era conhecida internacionalmente, por um bom tempo, como *Metal Inerte/Active Gas* (MIG/MAG) e recentemente alterada para *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) “é um processo de soldagem ao arco, que utiliza um arco entre um eletrodo de metal, com alimentação contínua e a poça de solda. O processo utiliza um gás de proteção fornecido externamente e sem a aplicação de pressão”¹⁹. A Figura 3.5 representa o processo de soldagem SAMG, no preenchimento de uma junta do tipo V.

O processo SAMG tem o início de sua história, em meados dos anos 1920, quando L.J. Weber executou soldas, empregando um eletrodo nu, numa atmosfera de gás hélio, aumentando a ductilidade dos cordões e evitando porosidades. Nesta época, os custos dos gases utilizados para produzir atmosferas especiais de soldagem era considerado inviável, para a aplicação industrial, uma vez que havia muita dificuldade operacional. Além disso, no mesmo período, estava sendo introduzida, no mercado, a aplicação de eletrodos revestidos, que atendia aos requisitos necessários àquela época^{11,24}.

Este processo somente foi viabilizado, após o desenvolvimento do processo SATG (Soldagem ao Arco Tungstênio com Proteção Gasosa), o qual possui um bocal, por onde sai um gás inerte, que protege a região da solda, uma novidade para a época. O processo tornou-se comercialmente viável, após 1948, com a redução dos custos dos gases inertes e a elevada qualidade das soldas, culminando, em 1950, com o depósito de patente do processo pela Airco (EUA).^{19,24}

Figura 3.5 -Representação esquemática da soldagem SAMG²⁴

O processo de soldagem denominado MIG é aquele realizado por fusão a arco elétrico que utiliza um arame de eletrodo consumível, continuamente alimentado à poça de fusão e um gás inerte, como por exemplo, Ar, He ou a mistura de ambos, para a proteção da região de soldagem. Já o processo de soldagem, denominado MAG é aquele em que é utilizado um gás ativo, como por exemplo, o CO₂ que, além da proteção da região de soldagem, interage, quimicamente com a poça de fusão²⁰.

A abreviatura do inglês *Gas Metal Arc Welding* – GMAW é a designação que engloba os dois processos acima citados, assim como a designação em português, Soldagem a Arco Metálico com Atmosfera Gasosa (SAMG).

As diferenças entre esses dois processos de soldagem encontram-se no gás utilizado e no tipo de arame, posto que os outros componentes são os mesmos. A alta produtividade se apresenta como uma das principais características deste processo de soldagem, que acontece pela alimentação contínua do arame e pelas altas densidades de correntes, em que o processo pode ser utilizado.

Principais vantagens do processo SAMG são:^{11,19,20}

- a) Alta taxa de deposição.
- b) Alto fator de trabalho.
- c) Grande versatilidade, quanto ao tipo de material e espessuras aplicáveis.

- d) Solda, em todas as posições.
- e) Não existência de fluxos de soldagem.
- f) Ausência de operações de remoção de escória.
- g) Processo que pode ser facilmente automatizado.
- h) Exigência de menor habilidade do soldador, quando comparada à soldagem, com eletrodos revestidos.
- i) Cordão de solda, com bom acabamento.
- j) Gera pouca quantidade de fumos.
- k) Soldas de relativa qualidade.

As principais desvantagens ou limitações do processo SAMG são:^{11,19,20}

- a) Regulagem do processo, bastante complexa. Necessidade de um ajuste rigoroso de parâmetros, para se obter um determinado conjunto de características para solda.
- b) Não deve ser utilizado em presença de corrente de ar.
- c) Menor variedade de consumíveis.
- d) Probabilidade elevada de gerar porosidades, no cordão de solda.
- e) Produção de respingos.

Com a intenção de melhoria do formato do cordão e redução do nível de respingos, estudos levaram ao desenvolvimento do processo conhecido como Soldagem ao Arco com Arame Tubular (SAT), sendo sua denominação em inglês *Flux Cored Arc Welding* (FCAW), onde seu interior é recheado de fluxos, que possuem as mesmas características e funções dos eletrodos revestidos. Esses arames tubulares podem ser utilizados com ou sem proteção gasosa, neste caso, sendo denominado de processo NON-GAS. Neste processo, o fluxo contido dentro do arame gera o gás de proteção da poça de fusão, a formação de escória, a desoxidação da poça e a estabilização do arco²⁰.

A utilização desses processos, para a execução de revestimentos e/ou reparos em componentes submetidos à operações que resultem em desgaste excessivo, tem ocorrido, largamente, em virtude da alta taxa de deposição⁹, mas encontra um obstáculo na variedade de ligas, pois as mesmas são determinadas pelos fabricantes, demorando um tempo considerável para produção e aplicação de novas

composições, se comparado com processos que utilizam pó metálico, como material de adição.

3.3.4 Processo de Soldagem ao Arco Submerso (SAS)

A Soldagem ao Arco Submerso (SAS), do inglês *Submerged Arc Welding* (SAW) é um processo de soldagem por fusão, onde um arco elétrico é desenvolvido entre a peça e um eletrodo metálico consumível, continuamente, alimentado, provocando a coalescência entre os mesmos, conforme Figura 3.6. Uma camada de material, na forma granular, denominado fluxo, recobre o arco elétrico parcialmente, protegendo o arco e a poça de fusão, formando uma camada sólida de escória, inibindo a ação contaminadora da atmosfera e evitando um resfriamento rápido, do material depositado^{11,19,20}.

Figura 3.6 - Representação esquemática da Soldagem ao Arco Submerso²⁰

Pelas possibilidades de preparo do fluxo ativo ou neutro, que pode ou não adicionar elementos de ligas e aliados às características do eletrodo consumível, bem como a alta taxa de deposição, é um processo muito utilizado na soldagem de estruturas metálicas, produção de tubulações e em revestimentos resistentes aos variados tipos de desgaste, tanto na fabricação, como na recuperação de peças^{9,25}.

No Brasil, as indústrias que se dedicam, exclusivamente, à fabricação de consumíveis para arco submerso, têm condições de produzir combinações fluxo/arame, para proteger contra todo e qualquer tipo de desgaste das ligas ferrosas comerciais⁹.

É possível adicionar fluxos ligados, com arames não ligados; fluxos neutros, com arames ligados; fluxos ativos, com arames ligados, para revestir partes com altas solicitações, desgastes por fricção, impacto ou outros. Um exemplo disto é a larga aplicação deste processo, em partes rodantes de tratores, ou mesmo, em partes planas, que exigem alta taxa de depósito⁹.

Para os casos de arames ligados a fluxos ativos, desenvolvem-se hoje, trabalhos em siderúrgicas, com aplicações em rolos de lingotamento contínuo, rolos de laminação, rodas de trem, etc., cujos resultados têm se mostrado satisfatórios, conseguindo atingir tempo de vida útil, compatível com as necessidades. Através do processo ao arco submerso, consegue-se depositar ligas com durezas, variando desde 20 até 60 RC, inclusive ligas nobres, com alta resistência à corrosão e à alta temperatura⁹.

Para aumentar a velocidade de soldagem e a deposição do metal, podem-se usar dois ou mais arames eletrodos ou fitas; eles podem situar-se em paralelo ou em linha, em relação à junta e alimentados por uma ou mais fontes de energia²⁵.

Principais vantagens do processo SAS: ^{11,20,25}

- a) Este processo permite obter um grande rendimento térmico, pois o arco elétrico fica enclausurado.
- b) Alcança-se uma elevada taxa de deposição de material de adição, que em consequência, propicia uma grande velocidade de soldagem.
- c) Consegue-se alcançar uma grande penetração, com este tipo de processo, o que diminui a necessidade de abertura de chanfro.
- d) Possibilita ao operador, dispensar o uso de máscara de proteção, devido ao arco não visível.
- e) Permite obter rendimento de deposição, superior ao da maioria dos outros processos.
- f) Facilmente mecanizado.
- g) Ausência de respingos e fumos.

Principais desvantagens ou limitações do processo SAS: ^{11,20,25}

- a) A soldagem pode se realizar somente nos limites da posição plana (ou em filete horizontal, desde que haja um suporte adequado para o pó).

- b) É praticamente impossível soldar juntas de difícil acesso.
- c) Há necessidade de remoção de escória, a cada passe de soldagem.
- d) Aporte térmico elevado, que pode prejudicar as propriedades da junta.
- e) A superfície do chanfro deve ser regular e a ajustagem da junta bastante uniforme.

3.3.5 Processo de Soldagem ao Arco Tungstênio com Atmosfera Gasosa (SATG)

A Soldagem ao Arco Tungstênio com Atmosfera Gasosa (SATG) é conhecido internacionalmente, como *Tungsten Inert Gas* (TIG) e, mais recentemente por *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW). É um processo que utiliza um arco elétrico, entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a poça de soldagem. Neste processo, a poça de fusão, o eletrodo e parte do cordão são protegidos por um gás inerte, que é soprado pelo bocal da tocha, podendo utilizar ou não, material de adição^{19,20,26}. A soldagem SATG produz uma solda limpa e de alta qualidade. Como não gera escória, a chance de inclusões no metal de solda é eliminada, e a solda não necessita de limpeza, no final do processo.

De acordo com a AWS¹⁹, H. M. Hobart, patente U.S. 1,746,081 e P. K. Devers, patente U.S. 1,746,191, em 1926, foram os primeiros pesquisadores a utilizarem os princípios da solda SATG, ou seja, soldaram com um arco elétrico, entre um eletrodo não consumível de tungstênio (W) e um metal base, em uma câmara preenchida com gás inerte, rendendo a eles uma patente deste novo processo de soldagem. Somente em 1943, foi desenvolvida e patenteada por R. Meredhit, patente U.S. 2,274,631, a primeira tocha, com aplicação prática, onde se fixava o eletrodo de tungstênio, ao mesmo tempo em que um bocal alimentava, um gás inerte que envolvia o eletrodo, protegendo adequadamente o arco elétrico, durante a realização da solda.

O processo SATG pode soldar peças de pequenas espessuras, com adição de material ou, simplesmente pelo modo autógena. A taxa de alimentação de metal de aporte é, algumas vezes, independente da corrente de soldagem, permitindo assim, variações na fusão relativa do metal base e do metal de aporte. Quando se utiliza metal de adição, o controle de diluição e do aporte térmico podem ser obtidos, sem mudar a geometria do cordão de solda. Já a soldagem sem metal de adição pode

ser utilizada para metais reativos, tais como: o titânio e o zircônio, ou metais que formam óxidos refratários, como alumínio e magnésio, pois é considerada uma solda limpa. Atualmente, vem-se trabalhando com a alimentação automática de arame²⁷, denominados: Arame Frio (*Cold Wire*) e Arame Pré-aquecido (*Hot Wire*), Figura 3.7, o que aumenta, consideravelmente a taxa de deposição²⁶, uma vez que esse processo é considerado como um processo de baixa taxa de deposição, no caso de alimentação manual¹³, como ilustra a Figura 3.8.

Figura 3.7 - Representação esquemática de uma tocha SATG, com alimentação automática de arame²⁷

Figura 3.8 - Representação esquemática da solda SATG, com alimentação manual de arame²⁰

A utilização do processo SATG, em revestimentos duros, ainda apresenta-se como um processo de baixa produtividade, frente aos outros processos. Os metais de adição são na forma de varetas ou arames para alimentação contínua, com composição química pré-definida pelos fabricantes ou de acordo com orientações da

AWS. Em alguns casos, utiliza-se o processo SATG, apenas como fonte de calor, para fundir chapas finas ou lâminas de determinados materiais ao substrato, produzindo reações *in-situ*, entre os mesmos. Também vem sendo utilizada como fonte de calor, no método em que se prepara uma determinada liga na forma de pó, com um agente aglomerante, o qual é adicionado à superfície do substrato e, posteriormente secado e soldado²⁸, Figura 3.9. Este último é um processo bem lento pois, para se obter camadas espessas de revestimento, faz-se necessária a realização de vários passes.

Figura 3.9 - Representação esquemática de revestimento SATG, com utilização de pó metálico^{adaptado de 28}

Principais vantagens do processo SATG:^{11,19,20}

- a) Soldas de qualidade elevada podem ser realizadas em quase todos os metais e ligas soldáveis.
- b) Metal pode ser adicionado à poça de fusão, independentemente da corrente do arco.
- c) As soldas realizadas por este processo são limpas (isentas de respingos), livres de resíduos, oxidação ou escória.
- d) Frequentemente, não requerem tratamento pós-soldagem, mesmo quando usadas para a deposição de metal de aporte.

Principais desvantagens do processo SATG:^{11,19,20}

- a) Baixa taxa de deposição do metal de aporte.
- b) Impossibilidade de soldagem, em locais com corrente de ar.
- c) Possibilidade de inclusão de W, na solda.
- d) Emissão intensa de radiação ultravioleta e outras .
- e) Requer maior habilidade do soldador, em soldagens manuais.

3.3.5.1 Aplicações do Processo SATG em revestimentos duros

Várias pesquisas^{17,29,30} vêm sendo realizadas no processo SATG, tanto na tentativa de obtenção de ligas que atendam às exigências de operação, bem como na otimização dos parâmetros de processo, com efeitos na relação custo/benefício.

Nota-se que, quando se trata de deposição de pós, pelo processo SATG, os pesquisadores dispendem um tempo considerável, na preparação do substrato, para a realização do experimento, uma vez que, sem a utilização de um aglomerante para fixação do pó, sobre o substrato, ficaria impossível a realização do mesmo²⁸. Apesar desta dificuldade na preparação, os resultados obtidos são satisfatórios, mesmo com a utilização de diferentes composições de ligas, de substratos e de parâmetros de soldagem.

A utilização da liga Stellite 6, na forma de pó ou varetas, vem sendo estudada em revestimentos, com a deposição na sua composição química pura ou com a adição de outros elementos, na tentativa de melhorar as propriedades dos revestimentos. Tais estudos têm alcançado resultados com excelente qualidade, tanto na resistência ao desgaste, como na corrosão, além de manutenção dessas propriedades, em temperaturas mais elevadas. O comportamento dessas propriedades tem relação direta com os parâmetros do processo, sendo o mais importante a corrente de soldagem utilizada, pois sua intensidade e tipo, tem influência direta na diluição e microestrutura^{17, 29, 30}.

Outras ligas vêm sendo testadas, pelo processo SATG, com a preparação dos pós, conforme mencionado acima, com grande variação, em sua composição química e de substratos. Em revestimentos sobre substrato de aço SAE 1020, com deposição de liga reforçada com carbeto de silício, foi observada uma microestrutura à base de carbonetos primários M_7C_3 , Fe_3Si , SiC , e precipitados de carbono

grafítico e uma dureza que variava de 744 a 1135 HV³¹. Com a variação da composição de uma mistura de pós, com alto teor de carbono-ferro e cromo, foram verificadas estruturas resultantes, compostas por cementita de contorno de grão, cementita intragranular, perlita, martensita e carbonetos, em fase eutética (Cr_7C_3), com valores de dureza variando de 350 a 800 HV e observou-se que quanto maior a quantidade de calor e maior a quantidade de carbono e cromo, na mistura, melhores foram os resultados, para a resistência ao desgaste³².

Uma microestrutura contendo fases TiC , $\alpha\text{-Fe}$, $\gamma\text{-Fe}$, $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ e FeB , foi observada no revestimento de um aço AISI 1045, como substrato, utilizando-se como depósito uma mistura de grafite, ferrotitanium e Fe-Cr-B-Si , em pó. A proporção de Fe, Ti e C é correspondente a estequiométrica TiC , mais precisamente uma mistura de uma liga auto-fluxante de Fe em pó, como base, sendo adicionada a este, uma liga de ferro-titânio (FeTi) e grafite (99,5% pureza)³³.

Foi observada uma microestrutura predominante de TiC , TiB_2 e $\alpha\text{-Fe}$, apresentando uma dureza de 900 HV, aproximadamente, 4 vezes maior que a do substrato, sendo este um aço estrutural Q235, similar ao ASTM A283, revestido com pós de Ti, B_4C e Fe, em quatro combinações de composição³⁴.

Em outro revestimento de aço para beneficiamento, AISI 4340, utilizando uma liga em pó de carboneto de tungstênio, foi observada uma microestrutura composta por WC e W_2C , com elevada dureza, entre 950 HV e 1200 HV. Relacionou-se tais resultados com a velocidade de alimentação de pó e quantidade de calor, introduzida no processo³⁵.

Resultados com elevada dureza também foram alcançados num revestimento de aço inoxidável austenítico AISI 304, utilizando pó de carboneto de silício, em diferentes concentrações, resultando numa microestrutura dendrítica, com carbonetos primários M_7C_3 completamente dissolvidos, a qual foi relacionada com a variação dos parâmetros de soldagem. Esta microestrutura apresentou valores de dureza de 550 HV a 750 HV, para uma estrutura dendrítica e de 890 HV a 1210 HV, na região hipereutética³⁶.

Recentemente, foram testadas deposições de TiN em pó, sobre um substrato de Ti6Al4V , onde foi observada a produção in-situ de TiN_x dispersos, uniformemente, no revestimento, com melhora na resistência ao desgaste. Durante a solidificação, foi observada uma microestrutura com aparência dendrítica³⁷.

Estudos similares utilizaram como substrato, uma placa de titânio, com deposição de Ti-Al a 53% e 47%, em peso de Al respectivamente, resultando numa microestrutura composta por Ti_3Al e $TiAl$ e uma dureza de 500 a 600 HV³⁸. O mesmo autor, em outra pesquisa, e apenas variando a quantidade de calor fornecido ao processo, numa atmosfera de nitrogênio, sem a deposição de material algum, obteve uma microestrutura composta por nitretos de titânio, com uma dureza de 2000 HV³⁹.

Os estudos não se concentram, apenas, na resistência ao desgaste por abrasão, dos revestimentos, mas também em outras propriedades, como por exemplo: na resistência à cavitação⁴⁰; nas propriedades magnéticas e sua correlação com a diluição e a dureza que, por sua vez, tem influência direta, da microestrutura resultante⁴¹.

Os exemplos acima citados mostram apenas algumas aplicações do processo SATG, em trabalhos de pesquisa sobre revestimentos. Nota-se uma grande variedade, na composição de ligas e substratos testados e com bons resultados, na qualidade dos revestimentos, proporcionados pela microestrutura refinada e homogênea, com possibilidades de melhorias, nas propriedades, através de uma adequada seleção dos parâmetros de soldagem.

3.3.6 Processo de Soldagem ao Arco Plasma (SAP)

O Processo de Soldagem ao Arco Plasma (SAP) do inglês *Plasma Arc Welding* (PAW) foi desenvolvido por Robert M. Gage, tem sua patente datada em 1953, nos Estados Unidos, sob nº U.S. 2,806,124. Inicialmente, este processo era utilizado em operações de corte de metais, visto que o mesmo é considerado como uma evolução do processo de Soldagem SATG, que na época era pesquisado para a utilização, em operação de corte¹⁹. Dentre as principais diferenças entre o processo SATG e SAP, destacam-se: no SAP, o posicionamento do eletrodo fica no interior da tocha e no SATG, o eletrodo é exposto; a configuração da tocha no SAP proporciona a constrição do arco e faz-se necessária a utilização de dois sistemas distintos de gás (gás de formação de plasma e gás de proteção), Figura 3.10.

Figura 3.10 - Representação esquemática do processo SAP⁴²

As primeiras aplicações do processo por plasma, em operações de soldagem e revestimento¹⁹, datam da década de 1960, podendo ser adicionado metal de adição, na forma de varetas ou arames, com alimentação manual ou automática e pós, com alimentação automática, podendo ser utilizado na configuração de arco transferido ou não transferido^{19,43}. Quando se trata de alimentação com arame, utilizando-se arco transferido, o processo recebe a denominação de Plasma de Arco Transferido Alimentado com Arame (PAT-A) ou *Plasma Transferred Arc – Wire (PTA-W)*, e quando se utiliza pó metálico, como material de adição, na configuração de arco transferido, o processo é denominado de Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó (PAT-P)¹⁸ ou *Plasma Transferred Arc – Powder (PTA-P)*. O processo de revestimento com pó metálico, por plasma a arco transferido foi oficialmente demonstrado e introduzido em 1961, com o nome de “Procedimento e Aparato para Aporte de Pó Metálico, Depositado e Soldado com Plasma de Arco Transferido”⁴⁴.

O fato deste processo utilizar materiais de adição, na forma de pó, possibilita a deposição de uma grande faixa de composições químicas, inclusive, permitindo o desenvolvimento in-situ⁴⁵, de ligas com propriedades específicas, para atender às exigências de operação.

O que difere os processos PAT-A e PAT-P é o surgimento do terceiro sistema de gás, conhecido como gás de transporte e é utilizado para alimentar o material na forma de pó, no feixe de plasma, Figura 3.11, que irá formar a poça fundida e dará origem ao revestimento⁴⁶. O gás utilizado para este fim, podem ser argônio, hélio ou mistura de argônio com hidrogênio.

Processo PAT-P

Processo PAT-A

Figura 3.11 - Representação esquemática do processo PAT-P e PAT-A⁴⁶

As principais vantagens do processo PAT-P são^{7,47}:

- a) Estabilidade do arco, mesmo com correntes baixas, devido ao bocal constritor.
- b) Concentração da energia, devido às características colimadas do feixe de plasma, proporcionando uma zona termicamente afetada (ZTA), mais estreita.
- c) As propriedades do plasma se mantêm, mesmo com pequenas variações de distâncias, entre a tocha e a peça.
- d) Outras características observadas são: depósitos homogêneos, com alta qualidade no acabamento e diluição baixa, em torno de 5 a 20%.

As principais desvantagens do processo PAT-P são^{7,47}:

- a) Alto custo do equipamento, com relação aos demais processos por arco elétrico
- b) Maior consumo de gás, se comparado com SATG

Este processo vem ganhando espaço, na aplicação industrial, no que diz respeito ao desenvolvimento de ligas especiais, para aplicações específicas, em peças e equipamentos, sujeitos aos variados tipos de desgastes.

Concomitante a este desenvolvimento industrial, está o desenvolvimento das pesquisas que, em muito, vem ajudar na elucidação de todas as características do processo.

Mesmo com a escassez de produção científica, vários grupos de pesquisa, no Brasil e no exterior, têm se utilizado do processo PAT-P, como instrumento para solução de problemas, em aplicações práticas, diretamente, nas indústrias.

A deposição de material, na forma de pó, além de possibilitar uma grande variedade na composição química das ligas; possibilita, também, a realização de estudos, na busca pelos melhores parâmetros de processamento dessas ligas, além de, despertar no setor, a busca pela otimização e inovação dos procedimentos, do processo, de softwares, de equipamentos e acessórios.

3.3.6.1 Aplicações do Processo PAT-P em revestimentos duros

As pesquisas, com relação ao processo PAT-P, quando utilizado para fins de revestimento duro, se concentram na avaliação dos parâmetros de processamento^{48,49}, na formação de carbeto ou intermetálicos in-situ^{50 a 55}, na otimização e inovação dos procedimentos, processos, softwares, equipamentos e acessórios.

Em uma pesquisa, utilizando como substrato, o aço ABNT 1020, foi analisado por exemplo, a influência dos parâmetros do processo (ângulo de afiação do eletrodo, vazão do gás de plasma e a constrição do bocal da tocha), utilizando-se como material de aporte, a liga pó atomizada à base de cobalto Stellite 6⁴⁸. As características dos revestimentos foram avaliadas, através da caracterização do acabamento superficial, diluição e da determinação da dureza. Verificou-se que tais características foram determinadas pela variação da intensidade de corrente, neste caso, utilizou-se corrente contínua, seguida pela constrição do bocal, a vazão do gás de plasma foi considerada como parâmetro secundário e a afiação do eletrodo não influenciou nos resultados⁴⁸. Em outro trabalho, estudou-se a influência da corrente pulsada, em revestimentos duros de cobalto, em aço-carbono e aço inoxidável. Os resultados mostraram que o uso de corrente pulsada leva a uma microestrutura mais fina, maior dureza e menor diluição. O papel do substrato depende do conjunto de parâmetros e de processamento utilizado⁴⁹.

O processo PAT-P permite o desenvolvimento in-situ, de diferentes ligas, carbetos e intermetálicos, impossíveis de serem obtidos pelos processos convencionais⁵⁰, que utilizam o arco elétrico como fonte de calor, pela deposição de misturas de pós. Em depósito de pós de Fe, Al, Cr, e Nb, foi verificada presença de intermetálicos FeAl, e Fe₃Al in-situ, com níveis de dureza próximos a 230 HV, para depósitos de FeAlCr e 300 HV, para depósitos de FeAlCrNb⁵¹.

Para depósitos contendo Nb, Ni, e Fe com Al, foi observada uma microestrutura uniforme, desenvolvida de acordo com cada sistema de ligas, ou seja, para revestimentos à base de Nb, obteve-se uma estrutura dendrítica, e para os depósitos de Ni e Fe, uma estrutura com características celulares. Neste caso, também foi observada a influência dos parâmetros do processo, nas características do revestimento, sendo que alterações na porcentagem de diluição afetaram os valores de dureza, que ficaram em torno de 400 HV para FeAl e de 900 HV, para NbAl⁵².

Ligas à base de cobalto também vêm sendo investigadas, em revestimentos por PTA, em alguns casos, enriquecidas com outros elementos, com o objetivo de avaliar as mesmas características acima citadas. Na microestrutura, formada pela deposição de ligas à base de CoCrW, foram desenvolvidos carbetos do tipo (Cr,Fe)₇C₃ e após tratamento de envelhecimento, carbetos do tipo M₂₃C₆, que, embora tenham provocado um aumento nos valores de dureza, causaram uma diminuição na resistência ao desgaste⁵³. Quando adicionada à mistura, uma quantidade limitada de óxido de ítrio (Y₂O₃), depositados sobre aço-carbono Q235A, verificou-se um refino da microestrutura e formação de carbetos do tipo M₇C₃, com melhores resultados para a resistência ao desgaste⁵⁴.

A deposição de uma determinada liga, sobre qualquer substrato, inquestionavelmente, produzirá o desenvolvimento de uma nova liga, com propriedades diferentes, dependendo do caso. No revestimento de um substrato de titânio puro, com carbetos de nióbio NbC, foi verificado o resultado da reação entre estes três componentes, produzindo uma microestrutura, com camadas de NbC, NbC/TiC e entre essas camadas, foram encontrados precipitados de TiC, cujo desenvolvimento foi relacionado à nucleação heterogênea e à energia livre de Gibbs⁵⁵, para a formação dessa fase.

3.3.7 Processo de Soldagem por LASER (SL)

A Soldagem por LASER (SL) ou *LASER Beam Welding* (LBW) é um processo de união baseado na fusão localizada da junta, através de seu bombardeamento, por um feixe de luz concentrada, coerente e monocromática, de alta intensidade. Este feixe é suficiente para fundir e vaporizar parte do material da junta, no ponto de entrada do feixe, causando um furo (*keyhole*) que penetra, profundamente, no metal de base^{18,56}.

O processo LASER, aplicada em operações de revestimento, tem avançado nos últimos anos, podendo depositar uma fina camada de material, sobre um substrato, com controle da espessura. É caracterizada por uma rápida interação, entre o feixe de alta densidade de energia, com o pó depositado e o substrato. Como resultado, o processo produz baixa energia de soldagem e faz com que ocorra menos distorção do componente e menor diluição do que os métodos convencionais. No processo de revestimento a LASER coaxial, o pó metálico é injetado, através de um bocal alinhado coaxialmente, com o feixe LASER. O pó absorve parte da energia produzida pelo laser, tornando-se parcialmente fundido, antes de tocar no substrato, Figura 3.12. Parte da energia do LASER também é absorvida, pela área da superfície do substrato, provocando a fusão, formando uma forte ligação metalúrgica, entre o substrato e a camada revestida. O revestimento a LASER pode ser utilizado, não só na área de produção de novos componentes, bem como, na restauração de componentes submetidos ao desgaste. O processo LASER produz ainda camadas em geral livre de defeitos⁵⁷.

Figura 3.12 - Representação esquemática de um bocal coaxial, de alimentação de pó utilizado em revestimento a LASER^{adaptado de 57}

3.3.8 Processos Híbridos de Soldagem

Ultimamente, a aplicação de novas tecnologias, no desenvolvimento de processos de soldagem, que permitam um aumento da produtividade e capacidade de produção, propiciou o surgimento dos Processos Híbridos de Soldagem. A combinação de mais de um processo de soldagem permite a obtenção de um novo processo, que pode apresentar vantagens sobre cada um dos processos iniciais. Os processos híbridos mais conhecidos são: MIG-LASER, TIG-LASER, Plasma-LASER, TIG-MIG, Plasma-MIG. A associação física de dois processos pode resultar na utilização do que há de melhor, em cada processo⁵⁸. Dentre as características dos processos híbridos podemos destacar a flexibilidade do processo em termos de “gap” (ajustes/alinhamentos) para soldagem e a atuação das fontes de calor onde, ambas atuam sobre a mesma poça de fusão, ao contrário da combinação de processos onde, cada uma das fontes cria a sua própria poça, atuando, separadamente⁹.

Estes processos podem ser utilizados, tanto para operações de soldagem, quanto para operações de revestimento, em recuperações de componentes desgastados ou produção de novos. As Figuras 3.13 e 3.14 são exemplos destes processos:

Figura 3.13 - Processo Híbrido MIG-LASER²⁰

Figura 3.14 - Desenho esquemático de uma tocha para soldagem Plasma-MIG⁵⁸ - processo patenteado por W. G. Essers, em 1980⁵⁹

3.4 Modelos de tochas e bicos injetores do processo PAT-P

Os estudos sobre a melhor configuração de tochas e bicos injetores, bem como os parâmetros ideais, utilizados no processo PAT-P, também vêm sendo discutidos pela comunidade acadêmica, com vistas a inovações no equipamento, que resultem

em revestimentos de melhor desempenho, com aproveitamento ideal do calor, introduzido no processo, menor diluição e maior aproveitamento da liga depositada (menor perda) bem como na possibilidade de uma composição variada da liga, ou seja, com adição de outros elementos, às ligas fundidas e atomizadas.

Nestes estudos, os pesquisadores tentam observar e mensurar os fenômenos que ocorrem durante a transferência do material de adição, até sua incorporação à poça de fusão, utilizando-se de cálculos numéricos, modelamento e simulação gráfica. Aos fenômenos observados, tem-se dado o nome de comportamento termocinético, referindo-se ao estado em que as partículas projetadas chegam à poça de fusão, se fundidas ou semi-fundidas e à trajetória espacial das mesmas, se chegam ou não à poça de fusão. As variáveis estudadas são: temperatura, velocidade de colisão e a entalpia das partículas, pois a combinação dos mesmos tem grande influência na formação microestrutural, homogeneidade na distribuição da composição química, temperatura da poça de fusão, molhabilidade e diluição⁶⁰.

Outros fatores vêm sendo objeto de estudos, como por exemplo: as propriedades dos gases de arraste, plasma e proteção, os parâmetros de corrente e velocidade de soldagem e comprimento do arco, cuja interação exerce grande influência, nas propriedades finais dos revestimentos.

De uma maneira geral, no desenvolvimento de uma tocha para aplicações de revestimento, devem ser consideradas as características geométricas da tocha, bem como um estudo de todos os fatores que, de uma maneira direta, irão influenciar nas propriedades dos revestimentos. Dentre as características geométricas da tocha, em particular da tocha PAT-P, pode-se destacar o orifício constritor, canais de alimentação de pó e circuito de refrigeração, sendo que os mesmos devem operar em condições que mantenham a integridade da tocha, com estabilidade do arco e adição de pó⁶⁰.

Os modelos de tochas existentes são classificados, considerando-se o modo de injeção de pó: injeção interna, injeção externa e injeção central. Esta classificação está relacionada com a distribuição das partículas, no arco elétrico, se coaxial ou através de canais concêntricos ao arco ou, simplesmente com a deposição do pó, pelo eixo central da tocha⁴⁴.

A injeção externa de pó é a mais difundida comercialmente. Ela se caracteriza pelo fato de os orifícios injetores se encontrarem na superfície

inferior do bico constritor. Dessa maneira, o material aportado viaja por determinado tempo, fora do arco, até adentrar o mesmo. O ponto focal será determinado pelo ângulo dos orifícios injetores, em relação ao eixo do arco elétrico e pela distância dos primeiros ao segundo⁴⁴.

A Figura 3.15, apresenta dois modelos de bico injetores, utilizados no processo PAT-P, em que são propostos dois ângulos de inclinação, para os canais com consequência na alteração do ponto focal.

Figura 3.15 - Configuração do bico constritor de injeção externa de pó – ângulo de inclinação dos canais injetores - 30° e 60°⁶¹

A Figura 3.16 apresenta uma proposta de bico, com apenas um canal injetor, onde observa-se o desvio do arco elétrico, provocado pela ação do gás de arraste. Esse desvio é entendido como prejudicial ao processo de revestimento, uma vez que a estabilidade e rigidez do arco são essenciais para a uniformidade e qualidade final dos revestimentos.

Figura 3.16 - Representação esquemática de um bico constritor, com 1 canal de alimentação ^{adaptado de 61}

A Figura 3.17 apresenta um bico constritor, com 2 canais de injeção de pó, alinhados a 180°.

Figura 3.17 – Bico constritor e canais de injeção externa de pó⁴-apud 44

A Figura 3.18 mostra o desenho esquemático de uma tocha PAT-P, do tipo injeção interna de pó, com circuito de refrigeração e gás de proteção. Neste modelo, são relatadas algumas observações interessantes, quanto à integridade da tocha, como por exemplo, a adesão de partículas fundidas ao bocal e canais de alimentação de pó, prejudicando assim, o desempenho final da tocha⁴⁴.

⁴ DRAUGELATES, U.; BOUAIFI, B.; SCHULTZE, S. Hochleistungs-Plasmapulverauftragschweißen mit Duplex-stählen. Schweissen & Schneiden, n. 5, p. 245-251. Düsseldorf, mai. 1999.

Figura 3.18 - Modelo de bico injetor com alimentação interna de pó ⁶¹

A Figura 3.19, resume o estudo do comportamento da trajetória das partículas, no espaço, compreendido entre o bico constritor e a peça, em tochas de injeção interna de pó, com variação dos ângulos dos canais de alimentação de pó, das velocidades de injeção e dos diâmetros das partículas.

Figura 3.19 - Trajetória das partículas com o ângulo. V_{p0} = Velocidade das partículas, no ponto de injeção ^{5-apud 44}

⁵ PAVLENKO, A. Neue Kenntnisse über Physikalische Grundlagen des Plasma-Pulver-Auftragschweißens als Basis für die Prozeßsteuerung. 1996. 118 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Rheinisch-Westfälisch Technisch Hochschule Aachen

Observa-se que o aproveitamento do material depositado depende, diretamente, da velocidade e do ângulo de incidência das partículas, bem como do tamanho das mesmas. Quanto maiores o ângulo, a velocidade e o tamanho das partículas, maior será a perda de material, ou seja, o ponto de colisão das partículas será fora da poça de fusão, passando pelo arco elétrico e num dos casos, se chocando com o bocal focalizador.

3.5 Comparação atual entre os processos SATG e PAT-P

Nos itens 3.3.5 e 3.3.6 deste capítulo, foram detalhados alguns aspectos dos processos de soldagem SATG e PAT-P, aplicados em operações de revestimento duro. Observa-se que, pelas vantagens relacionadas ao processo PAT-P, o mesmo se torna bastante atrativo, tanto para a utilização industrial, como para o desenvolvimento de novas pesquisas, em busca de melhores parâmetros de processo e inovações tecnológicas, na tocha, nos demais equipamentos e acessórios. Já o processo SATG também apresenta algumas vantagens, quanto à qualidade do revestimento mas, encontra uma barreira ou torna-se menos atrativo no que diz respeito à diluição e à baixa taxa de deposição, se comparado ao processo PAT-P.

Esses processos têm comportamento semelhante, quanto às condições operacionais e às características finais do revestimento, ou seja, aplicação em uma grande variedade de substratos, utilização de grande variedade e composição de ligas, como material de adição e facilidade de controle dos parâmetros do processo, com influência direta na microestrutura e diluição. Observou-se que a microestrutura final, quando da utilização da liga Stellite 6, como material de adição, tanto na forma de pó ou varetas, são similares com um refino maior para o PAT-P, que pode ser justificado pela baixa diluição do processo e aporte térmico.

A Tabela 3.5 apresenta uma comparação atual, entre os processos de SATG e PAT-P, utilizados para operações de revestimento duro.

Tabela 3.5 Comparação atual entre os processos SATG e PAT-P aplicados em revestimentos

	SATG	PAT-P
Deposição de ligas	Vareta, Arame e pó*	pó
Composição das ligas	varetas e arames - de acordo com fabricante pó - variável	Variável
Acabamento superficial	Bom	Bom
Taxa de deposição	Baixa – pó e vareta Boa – arame alim. autom.	Alta
Diluição	alta	baixa
porosidades	sem	sem
inclusões	Pode ter inclusão de W	Ausência
Sistema de gás	proteção	sistema de gás complexo: proteção, arraste e de plasma
Consumo de gás	≈7 l/m	≈ 20 l/m
Microestrutura	Refinada e homogênea	Refinada e homogênea
Velocidade de soldagem	baixa	de acordo com necessidade
Custo	baixo	Elevado: tocha plasma, sistema de alimentação de pó e fonte de plasma, maior consumo de gases
Funcionamento	Manual/automatizável	Manual/automatizável

*processo deposição muito lento

Considerando o quadro apresentado nesta revisão, propõe-se, neste trabalho, uma proposta de inovação, no processo de revestimento, utilizando-se a soldagem SATG, através do desenvolvimento de um dispositivo capaz de produzir revestimentos duros, com a injeção da liga na forma de pó, diretamente na poça de fusão, com qualidade e com melhoria na taxa de deposição a um custo acessível quando comparado com o processo PAT-P.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

As atividades experimentais deste trabalho foram desenvolvidas na seguinte sequência:

- Desenvolvimento do dispositivo
 - Projeto - Protótipos
 - Concepção
 - Produção
 - Adaptação à tocha SATG
 - Realização de testes preliminares
 - Calibração do protótipo
- Preparação dos substratos para os revestimentos
- Deposição dos revestimentos
- Caracterização dos revestimentos
 - Análise qualitativa dos depósitos, através de inspeção visual
 - Análise microestrutural por Microscopia Óptica (MO) e Eletrônica de Varredura (MEV)
 - Determinação da diluição
 - Levantamento dos perfis de microdureza
 - Difração de Raios-X
 - Ensaios de desgaste (roda de borracha)

4.1 Desenvolvimento do Dispositivo

No Capítulo 3, que trata da revisão bibliográfica, mais especificamente, no levantamento sobre a utilização do processo SATG, como um dos processos utilizados para a aplicação de revestimentos duros, foi verificado que, neste processo, as pesquisas, bem como sua aplicação industrial, se concentram na utilização de material de adição, em forma de varetas e arames, em processos inteiramente manuais, semiautomáticos ou totalmente automatizados. Verificou-se também que, quando se trata da utilização de ligas, em forma de pós, os pesquisadores^{31,32,33,37} dispendem um tempo considerável, na preparação do

substrato, para a realização do experimento, uma vez que, sem a utilização de um aglomerante, para a fixação do pó, sobre o substrato, ficaria impossível a realização do mesmo. Apesar desta dificuldade, na preparação, os resultados obtidos são satisfatórios, mesmo com a utilização de diferentes composições de ligas, de substratos e de parâmetros de soldagem, deixando, porém, muito a desejar, quanto à diluição e à taxa de deposição e, conseqüentemente, à sua produtividade.

Essa dificuldade relacionada à baixa taxa de deposição, tem levado as indústrias na busca por processos que melhore essa condição, bem como de novas alternativas, para a melhoria deste processo. Neste trabalho, é proposta uma inovação do processo de soldagem SATG, a qual se baseia na possibilidade de realização de revestimentos duros, com a utilização de ligas em forma de pó, depositados diretamente na poça de fusão, com a utilização de parâmetros de soldagem adequados, na manutenção das propriedades mecânicas da liga depositada, bem como num incremento considerável da taxa de deposição. Esta inovação compreende o projeto e a fabricação de um dispositivo, de fácil adaptação a qualquer tocha de soldagem SATG, que possa ter sua operação automatizada ou semi-automatizada, não alterando as características fundamentais do processo de soldagem SATG.

Para efeito de verificação, da viabilidade da aplicação deste processo, os resultados foram comparados com os do processo PAT-P, utilizando-se parâmetros aproximados entre os mesmos.

Para a concepção deste projeto, foi realizado um estudo no Capítulo 3, sobre os modelos de tochas de soldagem e bicos injetores existentes, atualmente, utilizados no processo PAT-P, bem como estudos sobre o comportamento de partículas projetadas em direção ao arco elétrico, para a deposição do pó, diretamente na poça de fusão, sem promover efeitos indesejados no arco elétrico e, conseqüentemente, no revestimento.

4.1.1 Protótipo 1

A Figura 4.1, mostra a representação de um dos modelos de protótipos estudados e testados, onde utiliza-se o mesmo princípio do processo, com alimentação automática de arame. Neste protótipo, utilizaram-se tubos de cobre, com diâmetros internos de 1,5, 3,0 e 4,0 mm, com variação da posição e do ângulo

de incidência do pó, mas sempre direcionado à poça de fusão. A adaptação à tocha SATG foi facilmente executada, com dispositivo que permitia o direcionamento da alimentação de pó, diretamente na poça de fusão, bem como, permitia a alteração no ângulo de incidência do mesmo. A alimentação de pó foi testada por gravidade, com taxa de deposição constante e do tipo forçada, com variação da vazão do gás de arraste e da taxa de deposição. Para este último caso, foi utilizado um sistema de alimentação automático de pó, do tipo ADP-2 de fabricação da IMC Soldagem de Santa Catarina. A tocha teve seu deslocamento controlado por um sistema automatizado, denominado Tartilope modelo V2, também de fabricação da IMC Soldagem.

Figura 4.1 - Representação esquemática de soldagem SATG, com alimentação automática de pó metálico, à frente da solda^{adaptado de 9}

Foram realizados testes de deposição, para a verificação dos revestimentos, sendo que, nestes testes, seriam observados apenas o aspecto visual externo do depósito, verificação da fusão completa do revestimento e sua adesão metalúrgica.

Os parâmetros utilizados para tal não levaram em conta a eficiência da deposição, ou seja, foi verificado apenas o aspecto qualitativo e não, o quantitativo dos revestimentos.

A Tabela 4.1 apresenta os parâmetros de soldagem, utilizados para a realização dos testes preliminares.

Tabela 4.1 - Parâmetros de soldagem para o protótipo 1

Corrente contínua / tecimento	Teste 1	Teste 2	Teste 3
Corrente – A		155	
Vazão gás de proteção - l/min		7,5	
Vazão do gás de arraste – l/min		1,5	
Velocidade de soldagem - cm/min		12	
Distância do eletrodo à peça – mm		10	
Afiação da ponta do eletrodo		30°	
Diâmetro do tubo de alimentação de pó - mm	1,5 – 3 – 4	1,5 – 3 – 4	1,5 – 3 – 4
Ângulo de incidência do pó	25° – 35° – 45°	25° – 35° – 45°	25° – 35° – 45°
Taxa de deposição – g/min	9,5	13	19

4.1.2 Protótipo 2

O protótipo 2 teve sua idéia baseada nos modelos de bicos similares aos utilizados no processo PAT-P, Figura 4.2, com as devidas adaptações, pois na soldagem SATG o eletrodo é exposto e não existe gás de plasma. A Figura 4.3 é uma representação esquemática, de como poderia ser um conjunto bocal/bico de alimentação de pó, para o processo SATG.

Figura 4.2 - Representação esquemática de um conjunto bocal/bico de alimentação de pó de uma tocha PAT-P⁶¹

Figura 4.3 - Representação esquemática de um conjunto bocal/bico de alimentação de pó de uma tocha SATG-P

A configuração do bico direcionador (Figura 4.4), que é responsável pelo direcionamento do pó (liga) à região de fusão, para este protótipo, apresenta 4 furos concêntricos, de diâmetro 1,5 mm, com ângulo de incidência de 15° , e distância focal de 10 mm, abaixo do bico. O bico foi projetado para a utilização de eletrodos, com diâmetros diferentes, podendo variar de 1,2 a 5 mm, devido às faixas de corrente elétrica, utilizada no processo SATG.

Figura 4.4 - Desenho do bico direcionador com 4 furos concêntricos

As dimensões iniciais deste modelo foram obtidas a partir de um modelo de bico de uma tocha PAT-P, a qual a UTFPR dispõe em seu Laboratório de Soldagem, no Campus Cornélio Procópio. Foi usinado em cobre, em duas partes e posteriormente, soldadas com solda prata. Este bico apresenta um espaço vazio, entre suas partes, que permite a refrigeração por água. Juntamente com a idéia de utilização deste modelo de bico, surgiu a necessidade de projetar e produzir os elementos do dispositivo de adaptação do mesmo, à tocha de soldagem SATG, tratado com maiores detalhes no Item 4.2.

Após a adaptação, foram realizados os testes preliminares de deposição, com a mesma finalidade dos testes realizados para o protótipo 1, utilizando-se dos mesmos sistemas de alimentação automático de pó e de deslocamento da tocha sendo que, os parâmetros para estes testes são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Parâmetros de soldagem para o protótipo 2

Corrente contínua / tecimento	Teste 1	Teste 2	Teste 3
Corrente – A		155	
Amplitude – mm		15	
Distância entre passes – mm		4	
Vazão gás de proteção - l/min		10	
Vazão do gás de arraste – l/min	1,5	2,0	3,0
Velocidade de soldagem – cm/min		12	
Distância do eletrodo à peça – mm		7	
Diâmetro do eletrodo mm		3,2	
Afiação da ponta do eletrodo		30°	
Distancia do bocal e bico à peça - mm		10	
Taxa de deposição – g/min	9,5	13	19

4.1.3 Protótipo 3

O protótipo 3 foi idealizado, projetado e executado, após os testes preliminares do protótipo 2, corrigindo-se alguns problemas, entre eles: o diâmetro de disposição dos furos de alimentação de pó; número mínimo de furos, distâncias máxima e mínima do bico à ponta do eletrodo e distâncias máxima e mínima da ponta do eletrodo ao substrado.

Utilizou-se a ferramenta Flow Simulação, do *software* Solid Works, para verificação do caminho percorrido pela liga, do ponto inicial de alimentação de pó, mais o gás de arraste, até atingir o substrato, ou seja, até a poça de fusão. As Figuras 4.5 e 4.6 ilustram a simulação utilizada, onde pode-se verificar o comportamento da liga, durante o percurso interno no dispositivo e, após a saída do canal de alimentação, até o seu impacto com o substrato.

Nesta simulação, pôde-se então, determinar as distâncias máxima e mínima do bico à ponta do eletrodo que, juntamente com o diâmetro da disposição dos furos de alimentação, permitiu observar a passagem do fluxo, sem haver contado do mesmo com a ponta do eletrodo, conforme Figura 4.5 (a), evitando assim, que partículas do pó aderissem ao mesmo, o que provocaria a instabilidade do arco elétrico e deterioração do eletrodo. Com relação às distâncias máxima e mínima, da

ponta do eletrodo ao substrato, a simulação permitiu observar os pontos de contato do pó, no substrato, utilizando-se como dados de entrada, a vazão do gás de arraste, velocidade de entrada das partículas da liga Stellite 6, bem como o diâmetro destas partículas. Como dado de saída, somente foi utilizada a pressão atmosférica. O *software* gerou uma malha padrão, do tipo hexaédrica com 5.433 pontos estudados, ilustrada na Figura 4.5 (b).

Figura 4.5 - a) Simulação de fluxo da liga, no protótipo 3 e b) visualização da malha de simulação do caminho percorrido pela liga

Figura 4.6 - Visualização do fluxo da liga, na saída do dispositivo

Levando-se em conta que, dependendo da faixa de corrente utilizada, da distância do eletrodo à peça e do ângulo de afiação do eletrodo, a poça de fusão apresentará um diâmetro ou largura variada e que, com o ângulo de incidência proposto no bico, todo material adicionado é levado para a poça de fusão. Outro fator a considerar é que, em se aumentando muito, esta distância, pode ocorrer a instabilidade do arco elétrico e ou sua extinção.

A Figura 4.7 representa o bico direcionador do protótipo 3, após análise do resultado da simulação e a ideia de se aumentar o número de furos, com o intuito de formar uma região que não permitisse a fuga ou desestabilização do arco. Propôs-se então, utilizar 8 furos concêntricos, de 1,25 mm de diâmetro, distanciados entre si a 45° e com diâmetro de disposição e ângulo de incidência adequados, para proporcionar um ponto focal de 13 mm abaixo do bico, sendo que, as demais características são idênticas a do protótipo 2.

Figura 4.7 - Desenho do bico direcionador, com 8 furos concêntricos

A Tabela 4.3 apresenta os parâmetros utilizados para a realização dos testes preliminares do protótipo 3. Esses parâmetros também serviram como balizadores, para a determinação dos parâmetros, para a realização dos testes quantitativos dos revestimentos.

Tabela 4.3 - Parâmetros de soldagem utilizados para testes do protótipo 3

Corrente contínua / tecimento	Teste 1	Teste 2	Teste 3
Corrente – A		155	
Amplitude – mm		15	
Distância entre passes – mm		4	
Vazão gás de proteção - l/min		10	
Vazão do gás de arraste – l/min		1,5	
Velocidade de soldagem – cm/min		12	
Distância do eletrodo à peça – mm		10	
Diâmetro do eletrodo – mm		3,2	
Afiação da ponta do eletrodo		30°	
Distancia do bocal e bico à peça – mm		13	
Taxa de deposição – g/min	9,5	13	19

4.2 Adaptação à tocha SATG

Todos os desenhos necessários à produção do dispositivo de adaptação à tocha de soldagem SATG foram elaborados, utilizando-se o software Solid Works, o qual também proporcionou a determinação das massas de cada item, para análise e comparação, com tochas SATG e PAT-P. A Figura 4.8 mostra o desenho em 3D, do protótipo 3.

Figura 4.8 - Desenho do protótipo 3 e dispositivo em 3D – software Solid Works

A Figura 4.9 mostra o desenho, em vista explodida do protótipo 3 e dos componentes do dispositivo de adaptação. Os demais itens, ou seja, parafusos e anéis de vedação, são encontrados no mercado comum de peças.

Para a produção ou usinagem dos componentes do dispositivo, bem como dos protótipos 2 e 3, foram utilizadas máquinas e ferramentas dos Laboratório de Usinagem e Soldagem da UTFPR, do Campus Cornélio Procópio. Os equipamentos utilizados foram: torno mecânico, da marca Nardini, modelo Mascote 1000, Fresadora Ferramenteira, da marca Mello, modelo F30 e solda oxigás.

Figura 4.9 - Desenho em vista explodida, do protótipo 3 e dispositivo de adaptação⁶²

A Tabela 4.4 apresenta a descrição de cada componente do dispositivo, material utilizado para a fabricação e massa de cada componente.

Tabela 4.4 - Descrição, material e massa dos componentes, do protótipo 3 e dispositivo de adaptação à tocha SATG

Descrição dos elementos	material	Massa projetada g	Massa usinada g
Bico direcionador	cobre	65,2	65
Bocal	Bronze/latão /material refratário	71 – Latão	55 – Latão
Difusor	Bronze/latão	137 – Latão	120 – Latão
Tampa fixadora	Bronze/latão /poliacetal	79 – Latão 13 – Poliacetal	70 – Latão 12,5 – Poliacetal
Corpo fixador	cobre	16,6	13,2
Massa dos componentes		368,8 / 302,8	323,2 / 265,7
Massa total com tubos de cobre soldados		430,3 / 364,3	384,7 / 327,2

A Figura 4.10 apresenta um desenho, em conjunto, e em corte total de todos os componentes, com detalhes de comunicações de vários canais e fixação dos componentes.

Figura 4.10 - Desenho em corte total do dispositivo, juntamente, com o protótipo 3⁶²

4.3 Calibração do equipamento

Para a calibração do equipamento, foi necessário levar em consideração os parâmetros de soldagem pré-estabelecidos, para o processo PAT-P, uma vez que os resultados entre os processos seriam comparados. Esta calibração envolveu algumas etapas fundamentais e determinação de alguns parâmetros de soldagem específicos, para este dispositivo, que permitissem a análise do comportamento do mesmo e dos revestimentos em si:

- Vazão ideal do gás de proteção
- Vazão ideal de gás do arraste e taxa de alimentação de pó metálico
- Velocidade de soldagem
- Corrente de soldagem

A análise, em separado, de cada um desses itens, inviabilizaria o trabalho, pois o resultado final depende da atuação, em conjunto, de todos os parâmetros, inclusive os já estabelecidos, anteriormente no item 4.1.3. Procurou-se trabalhar numa faixa de valores, em que os resultados finais da calibração proporcionassem depósitos, com qualidade no acabamento superficial e total ligação metalúrgica do substrato, com o material depositado.

4.3.1 Vazão ideal do gás de proteção

Para determinação da vazão ideal do gás de proteção, foram realizados testes de deposição, com velocidades de soldagem, variando de 10 a 15 cm/min e correntes de soldagem variando de 130 a 180 A. Para estes parâmetros, utilizou-se uma vazão de gás de 5 a 15 l/min, onde observou-se a proteção da poça de fusão, até sua solidificação, sem ocorrência de defeitos observáveis, visualmente, aumentando-se a vazão conforme aumentavam-se a corrente e a velocidade de soldagem. A Tabela 4.5 apresenta os parâmetros utilizados, para determinar a vazão ideal de gás de proteção, para a realização dos revestimentos.

Tabela 4.5 - Valores dos parâmetros de soldagem, para a determinação da vazão ideal de gás de proteção

Parâmetros combinados	Faixa de variação		
Correntes de soldagem - A	130	150	180
Velocidade de soldagem - cm/min	10	12	15
Vazão do gás de proteção – l/min	5	10	15

4.3.2 Vazão ideal de gás de arraste e taxa de alimentação de pó metálico

A determinação desses valores foi analisada em conjunto, pois o valor da vazão para o gás de arraste deveria ser o mínimo possível e, suficiente o bastante para conduzir todo o pó metálico, para a poça de fusão, sem provocar efeitos indesejáveis, no que diz respeito à estabilidade do arco elétrico e poça de fusão. Estes dados foram obtidos a partir da análise do comportamento do fluxo do pó

metálico, nos canais que conduzem o pó, no bico direcionador (protótipo 3). Esta análise foi realizada, conforme o item 4.1.3, com a utilização do software Solid Works. A taxa de alimentação foi variada, ficando entre 9,5 e 19 g/min, juntamente com a vazão do gás, sendo que, foi verificada a fusão do material depositado, para a faixa de corrente e velocidade de soldagem, informadas no item 4.3.1. A Tabela 4.6 mostra a combinação desses parâmetros.

Tabela 4.6 - Valores dos parâmetros utilizados, para a determinação da vazão mínima do gás de arraste e taxa de alimentação de pó

Parâmetros combinados	Faixa de variação		
Correntes de soldagem - A	130	150	180
Velocidade de soldagem - cm/min	10	12	15
Vazão do gás arraste – l/min	1 / 1,5 / 2	1 / 1,5 / 2	1 / 1,5 / 2,0
Taxa de alimentação de pó - g/min	9,5 / 14 / 19	9,5 / 14 / 19	9,5 / 14 / 19

4.4 Preparação dos substratos para o revestimento

Como substrato, foi utilizado o aço SAE 1020, usinado nas dimensões 120x50x12 mm e, posteriormente, retificado para a remoção de óxidos, óleo e sujeiras.

Foi utilizado como material de adição, a liga à base de cobalto, comercialmente conhecida como Stellite 6 WM do fabricante Deloro Stellite, na forma de pó, com granulometria entre 45 e 180 μm e dureza de 41,3 HRC, aproximadamente, 405 HV. A Tabela 4.7 apresenta a composição química nominal, do substrato e da liga Stellite 6, fornecida pelo fabricante.

Tabela 4.7 - Composição nominal do substrato SAE 1020 e da liga Stellite 6 (%peso)

	Co	Fe	C	Cr	Ni	W	Si	Mo	Mn	P	S	Outros
SAE 1020		Bal.	0,19						0,4	0,03	0,04	
Stellite 6	Bal.	2,13	1,13	30,85	2,39	4,65	1,40	0,35	0,25	0,005	0,006	0,40

4.5 Deposição dos revestimentos

Para a deposição do pó metálico, foi utilizado um sistema de alimentação automático, do tipo ADP-2 (Figura 4.11), fabricado pela IMC Soldagem de Santa Catarina, sendo as deposições controladas pela regulagem das rotações de uma roda dentada que, direciona o pó até uma câmara, de onde é conduzido ao duto de alimentação, auxiliado pelo gás de arraste.

Figura 4.11 - Foto do alimentador de pó ADP 2

Os cordões de solda foram realizados por uma central de soldagem, denominada Inversal 450, também de fabricação da IMC Soldagem, equipamento este que possibilita a execução de todos os processos de soldagem a arco. Sobre cada placa foi depositado um cordão, com a tocha desenvolvendo um deslocamento, na forma de tecimento, com amplitude de 25 mm e avanço de 4 mm, conforme Figura 4.12, promovido por um sistema automatizado denominado Tartilope, modelo V2, de fabricação da IMC Soldagem.

Figura 4.12 - Representação esquemática do deslocamento da tocha

Foi utilizada também uma câmera de alta velocidade, marca Dantec Dynamics, modelo NanoSense MkIII, do Laboratório de Ciências Térmicas (LACITE) do Departamento de Mecânica da UTFPR-Curitiba. Foi necessária a utilização de filtros, para amenizar os efeitos dos raios produzidos pelo arco elétrico da solda e facilitar a visualização e/ou filmagem do processo, em alta velocidade.

Foram realizadas filmagens, com velocidades de captura de imagens de 30, 50, 100 e 200 fps (*frames* por segundo), com o objetivo de verificar a estabilidade do arco elétrico.

Os revestimentos foram obtidos, através da deposição da liga pelos processos PAT-P, equipamento produzido pela IMC Soldagem e SATG. Todos os equipamentos estão disponíveis no Laboratório de Soldagem da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procopio.

Para efeito de comparação, entre os processos PAT-P e SATG, com deposição de pó, os parâmetros de soldagem, corrente, tensão e velocidade de soldagem foram idênticos. Foram realizadas 2 variações da taxa de deposição, nos processos para a verificação da diluição, sendo que, para o processo SATG, também foram realizados 2 ensaios, com movimentação manual da tocha. Houve uma diminuição da vazão do gás de arraste, sem a necessidade do gás de plasma, uma vez que, esta é uma característica do PAT-P. A Tabela 4.8 apresenta os parâmetros

utilizados para os dois processos, sendo que os do processo PAT-P foram obtidos da literatura e os do SATG resultantes da calibração do equipamento.

Tabela 4.8 - Parâmetros utilizados para realização dos revestimentos

Corrente contínua / tecimento	PAT-P A1	PAT-P A5	SATG – Autom. e Manual A1	SATG – Autom. e Manual A5
Corrente – A		155		
Amplitude – mm		25		
Distância entre passes – mm		4		
Vazão gás de proteção - l/min	15		10	
Vazão do gás de arraste – l/min	3,5		1,5	
Vazão do gás plasma – l/min	2,5		-	
Velocidade de soldagem – cm/min		12		
Distância do eletrodo à peça – mm	-		10	
Diâmetro do eletrodo - mm		3,2		
Afiação da ponta do eletrodo	-		30°	
Distância do bico à peça - mm	10		13	
Taxa de deposição – g/min	9,5	19	9,5	19

Os valores da vazão do gás de proteção e do gás de arraste foram determinados, de acordo com os itens 4.3.1 e 4.3.2, respectivamente.

4.6 Caracterização dos revestimentos

4.6.1 Inspeção Visual

Os revestimentos foram analisados, através da simples observação, a olho nu, com a intenção de avaliar, qualitativamente, o estado geral de acabamento superficial, na determinação de descontinuidades, que poderiam inviabilizar o procedimento, como por exemplo: porosidades, trincas longitudinais e transversais ao cordão e fissuras.

Utilizou-se de uma câmera fotográfica da marca Nikon, modelo D90, para o registro dos revestimentos.

4.6.2 Perfis de Microdureza

O perfil de microdureza determina a dureza, ao longo da secção transversal do revestimento, possibilitando uma comparação sobre a influência dos parâmetros de cada processamento, com os resultados da diluição e de dureza. Os perfis de microdureza foram medidos, na região central da seção transversal da amostra (Figura 4.13), sendo ainda desprezados os trechos iniciais e finais do cordão, onde são observados sinais de abertura e fechamento de arco.

Com a focalização do sistema ótico do microdurômetro, na superfície externa do revestimento, desloca-se 125 μm para a indentação da primeira impressão da primeira coluna de impressões. Depois, foram realizados avanços de 250 μm em direção ao substrato, para execução das impressões subsequentes, até ter-se alcançado, ao longo da direção de avanço, valores iguais de dureza, já no substrato. As colunas de impressões, subsequentes, guardaram um afastamento de 0,5 mm, valor maior que o mínimo recomendado pela norma, ou seja, 2,5 vezes a diagonal das impressões anteriores, de acordo com a norma ABNT NBR NM ISO 6507-1/2008⁶³.

No total, foram executadas 3 colunas de identações, com 20 medições cada coluna, sendo considerada a média dos 3 valores, situados na mesma distância da superfície externa das 3 colunas. Foi Utilizado um microdurômetro, da marca Microtest, Modelo HV 1000B, no laboratório de Materiais da UTFPR-campus CP. A carga utilizada no ensaio de microdureza Vickers foi de 500 g (HV 0,5).

Figura 4.13 - Representação esquemática do procedimento, para a determinação dos perfis de microdureza

4.6.3 Preparação Metalográfica

As metalografias foram realizadas, de acordo com os procedimentos padrões de preparação metalográfica. As amostras foram obtidas através do corte transversal dos revestimentos, em cortadora de amostras metalográficas. Cada amostra passou pelo lixamento, com lixas de grana 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh, sendo que o procedimento iniciava com a lixa de menor grana e terminava com a de maior grana, seguido de polimento, com alumina nº 4. Também foram descartados o início e fim do cordão, evitando o trecho de abertura e fechamento do arco.

O ataque químico foi executado com a solução de 15 ml H_2O , 15 ml HNO_3 , 15 ml CH_3COOH e 60 ml HCl ^{64,65}, por aproximadamente 1 minuto. Após o ataque químico, as amostras foram analisadas no microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura. Foi utilizado um microscópio metalográfico, da marca ZEISS, modelo AXio, com câmera digital ERc5S, do Laboratório de Microscopia Óptica do Departamento de Materiais da USP, de São Carlos. Por outro lado, o microscópio eletrônico de varredura (MEV-modo ESE) permitiu captar detalhes da microestrutura, em ampliações maiores. As fotomicrografias de MEV foram obtidas na Central de Análises Químicas Instrumentais, do Instituto de Química de São Carlos (CAQI/IQSC/USP) em um equipamento ZEISS LEO 440 (Cambridge, England), com detector OXFORD (model 7060), operando com feixe de elétrons de 20kV. Análise por Dispersão de Energia (EDS) foi realizada em um equipamento EDX LINK ANALYTICAL, (Isis System Series 200), com detetor de Si-Li Pentafet, janela ultrafina ATW II (Atmosphere Thin Window), de resolução de 133 eV à 5,9keV, acoplado ao Microscópio Eletrônico ZEISS LEO 440. Utilizou-se padrão de Co para calibração, feixe de elétrons de 20 kV, distância focal de 25 mm, dead time de 30%, corrente de 2,82 A e I probe de 950 pA .

A Difração de Raios-X (DRX) é o ensaio que completa a análise microestrutural do material, com a determinação das fases presentes. Foi utilizada uma máquina de raios-X, da marca Rigaku Rotaflex, modelo RU 200B do Laboratório de Raios-X, do Grupo de Cristalografia do IFSC da USP de São Carlos, para a determinação dos espectros de todas as variações de deposição testadas. Os parâmetros de varredura do feixe de raios-X, ou seja, velocidade e faixa de varredura, foi de $2\theta^0$, com comprimento de onda $\lambda = 1.5405 \text{ Cu}\alpha$

4.6.4 Determinação da Diluição

A diluição é um dos parâmetros fundamentais que caracterizam a microestrutura de um revestimento, bem como, o seu comportamento em serviço, pois tem relação direta com as alterações da composição química nominal da liga depositada que, por consequência, altera suas propriedades mecânicas. Como um dos objetivos desse trabalho foi verificar se os revestimentos proporcionados pelo novo método/processo eram compatíveis com os revestimentos obtidos por PAT-P, foram realizados testes, com duas variações da taxa de deposição, para a verificação da diluição e sua relação com as propriedades mecânicas do revestimento. O objetivo era obter uma camada de revestimento duro, sobre um substrato, com propriedades mecânicas bem distintas as da liga depositada que, neste caso, é a liga Stellite 6. Quanto maior for a diluição, mais as propriedades dos revestimentos estarão distantes das propriedades da liga nominal⁶⁴. Desta forma, procurou-se manter a diluição no menor patamar possível, sem deixar de obter uma ligação metalúrgica adequada ao revestimento, visto que um aumento da diluição causa uma diminuição na dureza do depósito e esta, por sua vez, aumenta o volume de desgaste, para o depósito diluído⁶⁵. Por outro lado, sabe-se que a diluição é influenciada pela corrente do arco, pela taxa de deposição, velocidade de deslocamento da tocha, comprimento do arco e frequência de oscilação da tocha⁶⁶.

A quantificação da diluição dos cordões foi realizada, através do método de relação das áreas, baseada na participação do substrato, para a formação do revestimento, Figura 4.14. Para revelar a região revestida e identificação das áreas, foi realizado ataque químico com Nital a 4%. Foi utilizado o software Digital Image Tool, para a delimitação e cálculo das áreas.

Figura 4.14 - Método da medição de diluição por penetração

4.6.5 Determinação do rendimento da deposição

Para determinação do rendimento da deposição foi necessária a realização de testes de deposição com o equipamento funcionando em vazio, bem como, a determinação do tempo gasto para tal. Esses valores foram determinados através da pesagem de pó em cinco testes de deposição para cada condição, com a movimentação automática da tocha pelo tempo estimado das mesmas. Após os testes, foi determinado os valores médios das deposições de pó.

No cálculo do rendimento da deposição, os corpos de prova foram pesados antes e depois de realizados os revestimentos. Ao todo foram três amostras para cada condição e posteriormente calculada a média da diferença de peso. A relação entre a média da diferença de peso e a média dos valores estimados nos testes de deposição, determinou o rendimento da deposição.

4.6.6 Ensaio de desgaste tipo Roda de Borracha

A intensidade do desgaste abrasivo, em qualquer sistema, depende do tamanho, forma e dureza das partículas e da intensidade da tensão, imposta pela partícula e a frequência de contato com o corpo de prova⁶⁷.

Os ensaios de desgaste foram realizados, utilizando-se um abrasômetro, do tipo Roda de Borracha, ilustrado pela Figura 4.15, pelo procedimento do tipo A, o qual é relativamente severo e que ordena materiais metálicos, numa larga escala de perda de volume, desde baixa a extrema resistência à abrasão, seguindo as orientações da norma ASTM G65-85⁶⁷, dentre as quais se destacam: as dimensões das amostras foram de 12,7 x 20 x 65 mm; disco de 12,7 x 228 mm; anel de borracha, com dureza de 60 Shore A; areia com classificação AFS 50/70; rotação do disco de 200 RPM; tempo de ensaio, de aproximadamente 30 min (ensaio tipo A); força nominal de 130 N. Para cada condição, foram realizados 3 ensaios. O desgaste foi obtido em função da perda de massa dos corpos de prova, pela comparação entre as massas, antes e após o ensaio, em balança eletrônica com resolução de 10^{-5} g. Antes da pesagem, as amostras foram cuidadosamente limpas, imersas em acetona e em seguida, secas com ar quente. A resistência ao desgaste

foi obtida pela relação inversa do desgaste, dividido pela distância percorrida, durante o ensaio.

Figura 4.15 - Representação esquemática do abrasômetro Roda de Borracha^{adaptado de 67}.

A Tabela 4.9 ilustra os parâmetros de teste do ensaio de desgaste, por Roda de Borracha, de acordo com a norma ASTM G65-85.

Tabela 4.9 - Parâmetros de teste, para ensaio de desgaste.

Descrição dos parâmetros	Valores
Dimensões do disco com anel de borracha	12,7 x 228,6 mm
Rotação do disco	200 rpm
Tempo de ensaio	Aproximadamente 30 min
Fluxo de areia	300 g/min
Dimensões do corpo de prova AxLxC*	12,7 x 20 x 65 mm

* A – Altura, L – Largura e C – Comprimento

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Resultados preliminares do protótipo 1

O protótipo 1 (Figura 5.1) cuja ideia foi apresentada no Capítulo 4, proporcionou resultados insatisfatórios, com relação ao fim desejado, como por exemplo: a contaminação muito rápida do eletrodo, provocava a instabilidade do arco elétrico, produção de cordões com geometria irregular, porosidades, falta de fusão (Figura 5.2) e perdas de mais de 50% do material depositado.

Figura 5.1 - Foto de uma das configurações do protótipo 1

Figura 5.2 - Foto dos cordões de solda SATG, com alimentação à frente do arco

Esta primeira tentativa de adaptação da tocha levou a outras configurações, tais como: a alimentação do pó por trás e pelo lado da solda, que também apresentaram os mesmos problemas, melhorando apenas na obtenção de um cordão, com geometria mais regular e redução das perdas para 40%. Deve-se considerar que estes resultados foram obtidos através da combinação dos parâmetros envolvidos, sendo eles: vazão do gás de arraste e de proteção; diâmetro do tubo de alimentação do pó; ângulo de incidência do pó; velocidade de soldagem; corrente de soldagem e distância do eletrodo ao substrato.

Para estes resultados, não se realizou nenhum ensaio, para a quantificação das características dos revestimentos, uma vez que, pela simples inspeção visual, foi detectado que estavam longe de atender aos objetivos propostos sendo, por isso, descartados.

5.2 Resultados preliminares do protótipo 2

O protótipo 2, também apresentado no Capítulo 6, apresentou melhores resultados, se comparados ao protótipo 1, mas ainda longe de serem o ideal desejado, para esta inovação. A Figura 5.3 é uma foto do conjunto bocal/bico direcionador, proposto para o protótipo 2. Observando-se as Figuras 5.4 e 5.5 nota-se grande quantidade de material fundido, aderido ao bico e eletrodo e um cordão de solda com muita porosidade e alguns pontos com falta de fusão do pó depositado. Aliado a esta situação, durante a execução dos depósitos, em observação do arco elétrico, pôde-se notar o desvio do mesmo, em vários momentos, desvios estes que se concentravam nas regiões onde não havia furos de alimentação de pó, provocando a instabilidade do arco, também observada no protótipo 1.

Figura 5.3 - Foto do bico, com 4 furos concêntricos – a) vista lateral, b) vista inferior

Figura 5.4 - Estado do eletrodo e bico, após o teste de deposição - Configuração do bocal/bico direcionador, com 4 furos concêntricos

Figura 5.5 - Resultado do revestimento da configuração bocal/bico direcionador, com 4 furos concêntricos

5.3 Resultados preliminares do protótipo 3

Os resultados preliminares do protótipo 3 são provenientes da utilização dos parâmetros pré determinados, sendo eles: vazão ideal de gás de proteção, vazão ideal de gás de arraste e taxa de deposição, ambos combinados com os valores de corrente e velocidade de soldagem. Verificou-se que para qualquer valor de corrente e de velocidade de soldagem, dentro da faixa estabelecida, as vazões de 7,5 a 10 l/min proporcionaram a proteção da poça de fusão, de maneira adequada e estavam

um pouco abaixo dos valores de vazão, utilizados em revestimentos, por PAT-P¹⁵. Quanto à vazão ideal de gás de arraste, esta também ficou abaixo dos valores encontrados para o PAT-P, e que a vazão de 1,5 l/min foi suficiente para levar todo pó metálico para a poça de fusão, considerando-se aí a variação da taxa de alimentação do mesmo.

A Figura 5.6 apresenta a foto do conjunto bocal/bico direcionador, proposto no protótipo 3, apresentado no Capítulo 4.

Figura 5.6 - Configuração do bocal/bico direcionador com 8 furos concêntricos

As Figuras 5.7 e 5.8 apresentam as fotos com vista superficial e em corte transversal ao cordão, respectivamente, de um revestimento realizado pelo protótipo 3, nas quais pode-se observar um bom acabamento superficial, sem porosidades e fusão completa do material depositado, evidenciando aí a ligação metalúrgica do processo.

Figura 5.7 - Foto da superfície do depósito pelo protótipo 3.

Figura 5.8 - Foto do depósito pelo protótipo 3, corte transversal, ataque Nital 4%.

A Figura 5.9 apresenta a foto do conjunto bocal/bico direcionador, do protótipo 3, com dispositivo de adaptação à tocha SATG, após teste preliminar de revestimento, onde pode-se observar que não ocorreu aderência de material, tanto no bico direcionador, quanto no eletrodo.

Figura 5.9 - Foto da vista inferior do protótipo 3, após teste de deposição.

Com base nestes resultados, pode-se concluir que a configuração do protótipo 3, bem como alguns parâmetros de processo pré-determinados, para a execução destes testes, proporcionaram resultados satisfatórios, para dar continuidade ao trabalho.

5.4 Resultados finais e discussão

Os resultados apresentados na sequência, se relacionam às análises dos depósitos efetuados pelos processos PAT-P, SATG-pó automático e SATG-pó semi-automático, com movimentação manual da tocha.

5.4.1 Protótipo 3 adaptado à tocha SATG

A Figura 5.10 mostra o protótipo 3, adaptado à tocha SATG. Para o efetivo funcionamento do dispositivo foi necessário um sistema adicional de refrigeração, por água e um sistema automático de alimentação de pó. Como a Universidade dispunha dos equipamentos para a realização dos testes, para o processo PAT-P, os mesmos foram adaptados e utilizados, na tocha SATG.

Figura 5.10 - Foto do dispositivo, logo após o funcionamento, configuração com 8 furos concêntricos, adaptado à tocha SATG - deposição automática

A Figura 5.11 ilustra a deposição, pelo processo SATG-pó automático, onde pode-se observar o fluxo de pó, em direção ao arco elétrico, com revestimento surgindo no lado direito da foto. Esta figura é uma foto retirada de uma filmagem de alta velocidade, em que a intenção era verificar se o comportamento do pó, após a saída do bico, se assemelharia à simulação da Figura 4.6, o que foi confirmado.

Figura 5.11 - Foto de alta velocidade da deposição de pó, pelo processo SATG-pó automático

5.4.2 Análise Visual

A Figura 5.12 mostra o aspecto superficial dos cordões, de todas as variações realizadas. Em todas as variações, os cordões apresentaram um bom acabamento superficial, levando-se em conta apenas a rugosidade. Já levando em conta a largura e altura dos cordões, os processos SATG-automático e PAT-P-automático apresentaram cordões similares entre si e mais uniformes, que o processo SATG-semi-automático (movimentação manual da tocha).

Figura 5.12 - Fotos dos cordões depositados (vista da superfície) - SATG–Pó automático e semi-automático e PAT-P.

A Figura 5.13, apresenta as seções transversais dos cordões, de todas as variações, observa-se de imediato uma menor diluição, melhor molhamento e maior largura do cordão PAT-P. Observa-se também que no processo SATG os depósitos mantêm uma mesma largura de cordão, com o aumento da altura e uma redução sensível da diluição, conforme incrementa-se a taxa de deposição. No cordão de maior taxa de deposição do processo SATG A5 – automático observam-se, ainda, regiões com falta de fusão (Figura 5.14) podendo-se atribuir a isso que a quantidade de energia produzida pelo arco, não foi suficiente para a fusão completa da liga

adicionada⁴⁷ ou a uma velocidade de deslocamento da tocha maior do que a necessária.

Figura 5.13 - Fotomacrografia dos revestimentos – corte transversal

Figura 5.14 - Detalhe da falta de fusão, revestimento SATG automático – A5.

5.4.3 Análise Microestrutural

5.4.3.1 Microscopia Óptica

As Figuras 5.15, 5.16 e 5.17 mostram as micrografias dos depósitos próximos à região de fusão e próximos da superfície do revestimento.

Figura 5.15 - Fotomicrografias do Revestimento SATG-Pó automático - A1– (a) próximo à interface e (b) próximo à superfície – A5 – (c) próximo à interface e (d) próximo à superfície.

Figura 5.16 - Fotomicrografias do Revestimento SATG-Pó semi-automático – A1 – (a) próximo à interface e (b) próximo à superfície – A5 – (c) próximo à interface e (d) próximo à superfície

Figura 5.17 - Fotomicrografias do Revestimento PAT-P A1– (a) próximo à interface (b) próximo à superfície – A5 – (c) próximo à interface e (d) próximo à superfície

Verificou-se que todas as micrografias obtidas se assemelham aos resultados obtidos por outros pesquisadores^{15,17,29,30,49,64}, que trabalharam com o processo PAT-P e por SATG onde, as estruturas mais refinadas estão próximas à superfície, sendo que na região próxima à fusão, observa-se um crescimento planar, o que é esperado, devido ao grande gradiente térmico local e posteriormente, um crescimento dendrítico. O que se pode notar é que essa estrutura é típica para solidificação de revestimentos à base de Co, mais precisamente da liga stellite 6 ou seja, em todas elas a microestrutura é hipoeutética, com dendritas primárias de uma solução sólida de cobalto CFC, rodeado pelo eutético interdendrítico⁶⁵.

5.4.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

As Figuras de 5.18 a 5.29 mostram os resultados das análises da Microscopia Eletrônica de Varredura, com os respectivos espectros das análises EDS, das regiões que identificam a microestrutura dos revestimentos, nas três condições realizadas neste trabalho, ou seja, SATG automático, SATG semi-automático e PAT-P. Para cada condição foram observadas as regiões próximas à superfície do revestimento e próximas à interface, com o material base. Observa-se uma microestrutura similar e característica para revestimentos, com ligas à base de cobalto, bem como uma composição química semelhante, para as três condições, com pequenas variações, provocadas pelas diferenças entre as diluições. Observa-se ainda que os principais elementos de ligas se distribuem com alta concentração de Co na região dendrítica e alta concentração de Cr na região interdendrítica. A análise EDS além de apresentar o espectro da região, também permite uma análise quantitativa do revestimento, apresentando a composição química global dos revestimentos. As Tabelas de 5.1 a 5.12 mostram a composição das fases presentes, de cada região analisada.

Figura 5.19 - MEV do revestimento por STAG-Pó semi-automático - A1 – 9,5 g/min - próximo à interface do revestimento e respectivos EDS, das regiões A e B

Tabela 5.2 - Composição química, detectada pela análise EDS, das regiões A e B, da deposição por STAG-Pó semi-automático – A1 – 9,5 g/min próximo à interface

Elementos	% em A	% em B
C	-	-
Cr	30,48	21,74
Fe	14,70	17,16
Co	47,98	57,19
W	6,05	2,95
Si	0,78	0,96
total	100	100

Figura 5. 20 - MEV do revestimento por STAG-Pó semi-automático - A5 – 19 g/min - próximo à superfície do revestimento e respectivos EDS, das regiões A e B

Tabela 5.3 - Composição química, detectada pela análise EDS, das regiões A e B, da deposição por STAG-Pó semi-automático – A5 – 19 g/min próximo à superfície

Elementos	% em A	% em B
C	-	-
Cr	30,96	19,35
Fe	23,13	27,93
Co	39,15	48,60
W	6,02	3,39
Si	0,75	0,73
total	100	100

Figura 5.21 - MEV do revestimento por STAG-Pó semi-automático - A5 – 19 g/min - próximo à interface do revestimento e respectivos EDS, das regiões A e B

Tabela 5.4 - Composição química, detectada pela análise EDS, das regiões A e B, da deposição por STAG-Pó semi-automático – A5 – 19 g/min próximo à interface

Elementos	% em A	% em B
C	7,05	-
Cr	36,11	24,12
Fe	25,74	13,15
Co	26,82	58,22
W	3,56	3,53
Si	0,72	0,98
total	100	100

Figura 5.22 - MEV do revestimento por STAG-Pó automático - A1 – 9,5 g/min - próximo à superfície do revestimento e respectivos EDS, das regiões A e B

Tabela 5.5 - Composição química, detectada pela análise EDS, das regiões A e B, da deposição por STAG-Pó automático - A1 – 9,5 g/min próximo à superfície

Elementos	% em A	% em B
C	8,58	3,81
Cr	43,68	19,77
Fe	13,94	22,09
Co	27,54	50,29
W	5,71	2,81
Si	0,55	1,23
total	100	100

Figura 5.23 - MEV do revestimento por STAG-Pó automático - A1 – 9,5 g/min - próximo à interface do revestimento e respectivos EDS, das regiões A e B

Tabela 5.6 - Composição química, detectada pela análise EDS, das regiões A e B, da deposição por STAG-Pó automático - A1 – 9,5 g/min próximo à interface

Elementos	% em A	% em B
C	7,29	4,61
Cr	37,41	19,60
Fe	16,50	22,44
Co	33,14	49,27
W	4,93	3,17
Si	0,73	0,91
total	100	100

Figura 5.24 - MEV do revestimento por STAG-Pó automático – A5 – 19 g/min - próximo à superfície do revestimento e respectivos EDS, das regiões A e B

Tabela 5.7 - Composição química, detectada pela análise EDS, das regiões A e B, da deposição por STAG-Pó automático – A5 – 19 g/min próximo à superfície

Elementos	% em A	% em B
C	-	-
Cr	44,18	24,53
Fe	4,46	6,07
Co	46,17	65,43
W	4,08	3,04
Si	1,11	0,93
total	100	100

Figura 5.25 - MEV do revestimento por STAG-Pó automático – A5 – 19 g/min - próximo à interface do revestimento e respectivos EDS, das regiões A e B

Tabela 5.8 - Composição química, detectada pela análise EDS, das regiões A e B, da deposição por STAG-Pó automático – A5 – 19 g/min próximo à interface

Elementos	% em A	% em B
C	5,94	-
Cr	37,22	26,34
Fe	6,24	8,45
Co	45,26	63,80
W	4,71	3,13
Si	0,62	1,01
total	100	100

Figura 5.26 - MEV do revestimento por PAT-P - A1 – 9,5 g/min - próximo à superfície do revestimento e respectivos EDS, das regiões A e B

Tabela 5.9 - Composição química, detectada pela análise EDS, das regiões A e B, da deposição por PAT-P – A1 – 9,5 g/min próximo à superfície

Elementos	% em A	% em B
C	7,71	-
Cr	36,60	22,98
Fe	8,35	11,43
Co	40,50	60,84
W	5,99	3,67
Si	0,86	1,07
total	100	100

Figura 5.27 - MEV do revestimento por PAT-P - A1 – 9,5 g/min - próximo à interface do revestimento e respectivos EDS, das regiões A e B

Tabela 5.10 - Composição química, detectada pela análise EDS, das regiões A e B, da deposição por PAT-P – A1 – 9,5 g/min próximo à interface

Elementos	% em A	% em B
C	8,76	-
Cr	38,20	23,06
Fe	8,42	11,99
Co	39,52	58,74
W	4,73	5,08
Si	0,66	1,12
total	100	100

Figura 5.28 - MEV do revestimento por PAT-P - A5 – 19 g/min - próximo à superfície do revestimento e respectivos EDS, das regiões A e B

Tabela 5.11 - Composição química, detectada pela análise EDS, das regiões A e B, da deposição por PAT-P – A5 – 19 g/min próximo à superfície

Elementos	% em A	% em B
C	-	-
Cr	34,41	23,95
Fe	6,75	8,18
Co	53,32	63,03
W	6,44	3,95
Si	1,08	0,89
total	100	100

Figura 5.29 - MEV do revestimento por PAT-P - A5 – 19 g/min - próximo à interface do revestimento e respectivos EDS, das regiões A e B

Tabela 5.12 - Composição química, detectada pela análise EDS, das regiões A e B, da deposição por PAT-P – A5 – 19 g/min próximo à interface

Elementos	% em A	% em B
C	7,80	-
Cr	48,08	24,84
Fe	2,81	4,61
Co	35,46	65,40
W	5,46	3,69
Si	0,39	1,45
total	100	100

5.4.4 Difração de Raios-X

Os difratogramas observados nos ensaios de difração de Raios-X apresentam padrões de difração semelhantes, evidenciando as principais fases presentes no revestimento, entre elas M_6C , M_7C_3 , $M_{23}C_6$ ^{29,31,35,40,41,53,69}. As Figuras de 5.30 a 5.35 mostram os difratogramas dos processos SATG automático, SATG semi-automático e PAT-P para as deposições de 9,5 e de 19 g/min, respectivamente. Observam-se espectros similares, entre os dois processos, mas não idênticos, com o surgimento de algumas fases identificadas como $\gamma-Co$ ^{35,40,69}, sendo estas últimas encontradas nas cartas de difratogramas, do banco de dados do software “Match! - Phase Identification from Powder Diffraction”, destacadas nas Figuras 5.30, 5.31 e 5.33. O surgimento destas fases pode estar relacionado às taxas elevadas de diluição do processo SATG, uma vez que, com o aumento da taxa de deposição, a diluição diminuiu e estas fases não apareceram. Porém, para o processo SATG semi-automático, esta observação não é válida, considerando-se que a movimentação da tocha foi realizada de forma manual e, em alguns pontos do revestimento, ocorreram a sobreposição de passes. Apesar disto, pode-se considerar que o difratograma da Figura 5.31 reflete a análise de uma região onde foi realizado o primeiro passe, por parte do operador, portanto, pode ter ocorrido neste ponto uma maior diluição, sendo que, seu efeito foi inibido pelo segundo passe.

Por outro lado, os difratogramas estão em consonância com os resultados obtidos pelas análises EDS, em que os principais elementos químicos identificados, aparecem isolados, como no caso do Co^{53} e combinados entre si, formando os carbetos já citados e as fases do tipo: $CoCr$.

Figura 5.30 - Difratoograma SATG-P automático – deposição 9,5 g/min

Figura 5.31 - Difratoograma SATG-P semi-automático – deposição 9,5 g/min

Figura 5.32 - Difratoograma PAT-P – deposição 9,5 g/min

Figura 5.33 - Difratoograma SATG-P automático – deposição 19 g/min

Figura 5.34 - Difratoograma SATG-P semi-automático – deposição 19 g/min

Figura 5.35 - Difratoograma PAT-P – deposição 19 g/min

5.4.5 Diluição e rendimento da deposição

Os resultados da diluição por penetração estão apresentados na Tabela 5.13, juntamente com os valores da taxa de deposição e seu rendimento. Como era de se esperar, o processo PAT-P apresenta menor valor de diluição, mesmo variando-se a taxa de deposição do pó metálico.

Tabela 5.13 - Resultados referentes à diluição e rendimento da deposição

	PAT-P A1	PAT-P A5	SATG- Autom. A1	SATG- Autom. A5	SATG- Semiautom. A1	SATG- Semiautom. A5
Taxa de deposição g/min	9,5	19	9,5	19	9,5	19
Rendimento da deposição	93%	93%	94%	87%	85%	85%
Diluição	7%	4,2%	17,4%	7%	10%	5%

Analizando somente os cordões depositados por SATG, observa-se uma redução considerável da diluição, quando se aumenta a taxa de deposição, chegando a valores bem próximos do PAT-P. Esta observação está de acordo com o verificado na literatura, ou seja, quanto maior a taxa de deposição, para um mesmo patamar de energia, menor a diluição⁶⁵.

Outras alternativas poderiam ter sido utilizadas, para verificar a variação da diluição, tais como o aumento da velocidade de soldagem, mantendo-se a mesma taxa de deposição e corrente ou diminuição da corrente e manutenção da taxa de deposição e corrente, bem como, aumentar a distância entre o eletrodo e o substrato, o que produziria um cordão mais largo e de menor penetração.

5.4.6 Aporte Térmico

A região da poça de fusão reproduz em pequena escala todos os fenômenos que normalmente ocorrem durante a solidificação de uma liga metálica, como nucleação e crescimento de cristais, formação de estruturas de grãos colunares ou equiaxiais, segregação e porosidades. Para uma determinada espessura e condutividade térmica da chapa, quanto maior o insumo de calor, menor a taxa de resfriamento da junta. O aporte de calor influencia diretamente o tempo de resfriamento e portanto a microestrutura da solda⁶⁸.

Em soldas de revestimento, os parâmetros e as variáveis do processo tem influência direta nos resultados da diluição, sendo esta, um dos aspectos mais relevantes para a qualidade do depósito. Um dos fatores desta influência está na condição termo-cinética das partículas quando são arremessadas à poça de fusão, ou seja, quanto de calor será necessário para as partículas se fundirem durante o trajeto da tocha de soldagem até a poça metálica. Portanto esta *“condição está sujeita, entre outros fatores, à forma como o pó é injetado ao arco, ou seja, da característica construtiva da tocha de soldagem”*⁴⁴.

O aspecto construtivo deste dispositivo proporciona o direcionamento das partículas de pó diretamente para a poça de fusão, Figuras 4.6 e 5.11. As partículas durante seu trajeto passam pelo arco elétrico, por um determinado tempo, o suficiente para se fundirem parcial ou totalmente até atingirem a poça de fusão, proporcionando ao processo uma redução significativa da diluição. Neste caso as partículas reduziram os efeitos da quantidade de calor, gerada pelos parâmetros do processo, que agiria sobre o metal de base.

Neste estudo o aporte térmico gerado pelos processos de revestimentos comparados é igual, não sendo considerada nestes casos a eficiência térmica dos mesmos. Foi estudada apenas a influência da variação da quantidade de liga adicionada para um mesmo patamar de energia, sendo que no processo SATG-Pó, foi também estudada a movimentação automática e semi-automática da tocha.

Para todas as condições foram observadas uma redução significativa dos valores da diluição, à medida que a taxa de deposição aumenta. O fato de aumentar a massa de material a ser fundida para uma mesma quantidade de energia, pode ter aumentado a taxa de resfriamento do revestimento, provocando uma microestrutura mais refinada. Esta variação na microestrutura pode ter causado um aumento da dureza e melhora da resistência ao desgaste, observados nos itens 5.4.7 e 5.4.8.

5.4.7 Microdureza

As Figuras 5.36 e 5.37 mostram os resultados dos ensaios de microdurezas, em função da distância das identações à superfície dos revestimentos. Pode-se observar uma maior concentração dos valores, entre 280 e 400 HV, para os processos SATG-P. Abaixo dos valores da liga estão apenas as amostras A1, dos processos SATG-P, onde se verifica uma maior diluição para esses dois depósitos.

Esta observação também foi relatada, em pesquisa, sobre a influência da diluição na dureza do revestimento, ou seja, quanto maior a diluição, menor a dureza⁶⁹.

Figura 5.36 - Perfis de microdurezas, para deposição de 9,5 g/min – amostras A1.

Figura 5.37 - Perfis de microdurezas, para deposição de 19 g/min – Amostras A5.

Alguns pesquisadores dizem não poder atribuir ou correlacionar os valores de dureza, simplesmente, com os valores da diluição⁵², cabendo ainda uma análise em conjunto, com a microestrutura resultante. Já para as outras amostras, todas apresentam valores que estão em conformidade com os da literatura e bem próximos do valor da liga depositada^{53,64} e até superiores. Considerando a margem de erro observa-se grande sobreposição de pontos entre os processos SATG-P automático, SATG-P semi-automático e PAT-P. Outra correlação a se levar em conta é quanto ao aporte de calor, pois uma vez aumentando-se a quantidade de material depositado, maior será a influência deste, na microestrutura resultante. Uma das consequências é a diminuição dos valores da diluição, observados neste trabalho, portanto, esperavam-se valores de dureza diferenciados, como pôde ser observado, mais claramente, com os resultados das amostras A5 da Figura 5.37.

Cabe ressaltar aqui, que a queda brusca dos valores da dureza, está relacionada com a realização das identações próximas ou no material base e corresponde, portanto, à interface revestimento/substrato.

5.4.8 Ensaio de desgaste abrasivo tipo roda de borracha

O equipamento “roda de borracha” promove o desgaste abrasivo a três corpos, no sistema fechado, onde as partículas de areia são aprisionadas, entre duas superfícies, que deslizam entre si. Neste caso, os ensaios foram realizados pelo procedimento do tipo A, o qual é considerado relativamente severo. Posteriormente à determinação da perda de massa, foi calculada a perda de volume, como é determinado pela norma do ensaio.

As Figuras 5.38 e 5.39 apresentam uma comparação da perda de volume, entre os testes de revestimentos utilizados, sendo que pode-se observar um melhor desempenho, nas duas condições, para o revestimento SATG-P semi-automático, com valores bem próximos aos do PAT-P. Observa-se ainda que, para a condição de deposição de 19 g/min, os valores do desgaste foram menores do que os valores da condição de deposição de 9,5 g/min. Tal comportamento pode ser atribuído à menor diluição dos revestimentos na condição de deposição de 19 g/min, pois quanto menor a diluição, mais a composição química está próxima da composição da liga depositada.

Figura 5.38 - Perda de volume, para o ensaio de desgaste, na condição de deposição de 9,5 g/min

Figura 5.39 - Perda de volume, para o ensaio de desgaste, na condição de deposição de 19 g/min

Ainda analisando estes gráficos, pode-se observar que, de acordo com as margens de erro, os comportamentos dos revestimentos foram semelhantes. Por outro lado, a perda de volume mais acentuada para a condição SATG automático com deposição de 9,5 g/min pode estar relacionada, também, ao surgimento da fase γ -Co, como observado nos respectivos espectros de Raios-X, fase esta que pode ocasionar uma diminuição da dureza do revestimento.

As Figuras 5.40, 5.41 e 5.42 mostram as superfícies das regiões de desgaste de um corpo de prova de cada revestimento e condição de ensaio. As superfícies desgastadas, analisadas, apresentam riscos, provavelmente, provocados pelas pontas das partículas duras de areia seca e possíveis fragmentos das superfícies.

Pela análise, apenas visual, das superfícies observa-se que os sulcos da Figura 5.42 (b), apresentam-se mais estreitos e menos profundos que os demais, podendo estar, esta condição, relacionada com os resultados de dureza e diluição, que são maiores e menores respectivamente. Pode-se observar também, que a Figura 5.40 (b), apresenta uma quantidade menor de riscos profundos, em relação às outras figuras, o que também pode estar relacionado com os ótimos valores de dureza e diluição, para esta condição, pois os mesmos estão bem próximos aos obtidos pelo processo PAT-P. Tal observação pode ser validada pela análise dos resultados de desgaste, Figura 5.39, onde esta condição foi a que resultou na menor perda de volume durante o ensaio.

Figura 5.40 - Foto da superfície desgastada SATG semi-automático (a) – deposição 9,5 g/min e (b) – deposição 19 g/min

Figura 5.41 - Foto da superfície desgastada SATG automático (a) – deposição 9,5 g/min e (b) – deposição 19 g/min

Figura 5.42 - Foto da superfície desgastada PAT-P (a) – deposição 9,5 g/min e (b) – deposição 19 g/min

6 CONCLUSÕES

- De acordo com os resultados obtidos, pode-se afirmar, com segurança, que todos os objetivos propostos foram alcançados, sejam eles:
 - O desenvolvimento de um dispositivo adaptável à uma tocha de soldagem SATG comum, capaz de produzir revestimentos duros, com deposição da liga, em forma de pó, diretamente na poça de fusão.
 - (Pedido de Patente: **Dispositivo de Revestimento de Superfícies Metálicas e sua Montagem**. BR n. PI 10 2013 001677-2, 23 jan. 2013)
 - Propriedades mecânicas e metalúrgicas adequadas dos revestimentos de teste:
 - A dureza encontra-se nos mesmos patamares dos valores encontrados na literatura e compatíveis com o processo PAT-P.
 - A resistência ao desgaste do processo SATG-P semi-automático apresenta valores bem próximos aos do PAT-P.
- Conclui-se ainda que:
 - O aumento da taxa de deposição no SATG-pó causou a diminuição dos valores da diluição, aproximando-os do processo PAT-P.
 - A diminuição da diluição aumentou os valores de dureza ocasionando a redução do desgaste.
 - As microestruturas resultantes do processo SATG-pó foram similares às obtidas pelo processo PAT-P.
 - O dispositivo SATG-P é de baixo custo de fabricação e de fácil adaptação à tocha de soldagem e de fácil operação pelo soldador

7 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

- Projeto de um alimentador de pó específico, para o processo SATG-pó
- Realização de revestimentos, com outras ligas ou adição de outros elementos, para a verificação de formação de carbetos in-situ.
- Tentativa de realização de revestimentos, fora da posição plana.
- Realização de testes, com outros parâmetros de soldagem, como por exemplo, a utilização de corrente pulsada.

8 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- 1 MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Anuário estatístico setor metalúrgico 2011**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/publicacoes/Anuarios/LIVRO_Metalurgico_WEB.pdf>. Acesso em: 01 de ago. de 2012.
- 2 SOLDA BRASIL 2011: seminário nacional de tecnologia e mercado de soldagem, 2011. Rio de Janeiro: ABITAM, 2011. Disponível em: <<http://www.abitam.com.br/img-fckeditor/file/INFORMATIVOSOLDA%20BRASIL.pdf>>. Acesso em: 01 de ago. de 2012.
- 3 SETOR de solda pode receber mais de 20% dos investimentos da Petrobras até 2014. In: SOLDA BRASIL 2011: seminário nacional de tecnologia e mercado de soldagem, 2011. Rio de Janeiro: ABITAM, 2011. Disponível em: <http://planejabrasil.wordpress.com/2011/07/08/setor-de-solda-pode-receber-mais-de-20-dos-investimentos-da-petrobras-ate-2014/>. Acesso em: 01 de ago. de 2012.
- 4 AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO. **Pré-sal demanda US\$ 400 bilhões até 2020**. S.I.: ANP, 2012. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?pg=60260&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1348497233479>>. Acesso em: 01 de ago. de 2012.
- 5 SOUZA, H. P.; TROMBINI, C. S. O.; CERETA, P. S. Análise de custos em uma empresa do setor metalúrgico da cidade de Santa Maria. **Revista Eletrônica de Contabilidade**, v.4, n.2. Disponível em: <<http://w3.ufsm.br/revistacontabeis/anterior/artigos/v4n02/t004.pdf>>. Acesso em: 01 de ago. de 2012.
- 6 LIMA, C.C.; TREVISAN, R. (2007). **Aspersão térmica, fundamentos e aplicações**. 2 ed. São Paulo: Artliber.
- 7 HARDFACING, weld cladding, and dissimilar metal joining. Ohio: ASM International, 1993.
- 8 COSTA LEAL, L. (2004). **Tribologia**: EMC 5315. Revisão Rodrigo Lima Stoeterau. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina. Apostila.
- 9 BAPTISTA, A.L.B.; NASCIMENTO, I.A. (2012). **Revestimentos duros resistentes ao desgaste depositados por soldagem utilizados na recuperação de elementos de máquinas**. Rio de Janeiro: Spectro. Disponível em: <<http://www.spectru.com.br/Metalurgia/diversos/soldadesgaste.pdf>>. Acesso em: 5 de abr. de 2012.
- 10 LIMA, A.C. **Estudo da aplicação de revestimento duro por soldagem com arames tubulares quanto à resistência ao desgaste de facas picadoras de cana-de-açúcar**. Universidade Federal de Uberlândia. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.
- 11 WAINER, E.; BRANDI, S.D.; MELLO, F.D.H. (1992). **Soldagem**: processos e metalurgia. São Paulo: Edgard Blucher.

- 12 ASM Handbook. Ohio: ASM International, 2002. v.11.
- 13 POLIDO, R. S.; GALLEGOS, J. (2012). **Estudo da microestrutura de revestimento duro aplicado nos equipamentos da indústria sucroalcooleira sujeito ao desgaste abrasivo.** Disponível em: <http://www.dem.feis.unesp.br/maprotec/publica/publicado2006/saitocicunesp2006.pdf> Acesso em: 07 de maio de 2012.
- 14 PRADEEP, G.R.C.; RAMESH, A.; PRASAD, B.D. (2010). A Review Paper on Hardfacing Processes and Materials. **International Journal of Engineering Science and Technology**, v.2, n.11, p.6507-6510.
- 15 TAKEYAMA, R.R.(2005). **Caracterização de revestimentos de ligas à base de Co modificadas pela adição de carbonetos de tungstênio.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- 16 ASM Handbook. 10 ed. Ohio: ASM International, [1990]. v.2.
- 17 BOND, D; D'OLIVEIRA, A.S.C.M. (2012). Effect of Current and Atomized Grain Size Distribution on the Solidification of Plasma Transferred Arc Coatings. **Materials Research**, v.15, n.5, p.770-774. .
- 18 ASM Handbook. Ohio: ASM International, 2004. v.9.
- 19 O'BRIEN, R.L. (Ed.). (1995). **Welding Handbook: Welding Processes.** 8 ed. v.2. S.I.: American Welding Society.
- 20 MODENESI, P.J.; MARQUES. P.V. **Soldagem I: introdução aos processos de soldagem.** Belo Horizonte: s.n., 2006. Notas de aula.
- 21 DELLORO STELLITE. (2013). **Powder Welding.** S.I.: Kennametal Stellite. Disponível em: <http://www.stellite.co.uk/WeldingProcesses/PowderWelding/tabid/75/Default.aspx>. Acesso em: 5 Apr. 2012.
- 22 ESAB. **Eletrodos Revestidos OK.** (2013). Revisão de Claudio Turani Vaz. S.I.: s.n. Disponível em: http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/biblioteca/upload/1901097rev0_ApostilaEletrodosRevestidos.pdf >. Acesso em: 3 abr. 2012.
- 23 KJELLBERG, O. **Verfahren und elektrode zum elektrischen schweissen.** ATD42671 19080309, 09 März. 1908, 25 Juni 1910. Disponível em: <http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&II=1&ND=6&adjacent=true&FT=D&date=19100625&CC=AT&NR=42671B&KC=B>>. Acesso em: 10 Apr. 2012.
- 24 ESAB. Soldagem MIG/MAG. Disponível em: http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/biblioteca/upload/1901104rev0_ApostilaSoldagemMIGMAG.pdf>. Acesso em: 5 abr. 2012.

- 25 ESAB. **Arco submerso**. Disponível em: <<http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/>>. Acesso em: 30 de abr. de 2012.
- 26 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE SOLDAGEM. A Soldagem GTAW (ou TIG). **Revista da Soldagem**, v.1, n.6, p.7-13. Disponível em: <http://www.soldaaautomatica.com.br/index_arquivos/Arquivos/PDF%2011%20-%20ABS%20Soldagem%20TIG.pdf>. Acesso em: 30 de abr. de 2012.
- 27 DELGADO, L. C. (2000). **Estudo e desenvolvimento do processo TIG com alimentação automática de arame**. 2000. 82 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- 28 MRIDHA, S; ONG, H.S.; CHEAND, P. (2001). Intermetallic coatings produced by TIG surface melting. **Journal of Materials Processing Technology**, v.113, n.1-3, p.516-520.
- 29 MADADI, F.; SHAMANIAN, M; ASHRAFIZADEH, F. (2011). Effect of pulse current on microstructure and wear resistance of Stellite6/tungsten carbide claddings produced by tungsten inert gas process. **Surface & Coatings Technology**, v.205, n.17-18, p.4320–4328.
- 30 MADADI, F.; SHRAFIZADEH, F.; SHAMANIAN, M. (2012). Optimization of pulsed TIG cladding process of stellite alloy on carbon steel using RSM. **Journal of Alloys and Compounds**, v.510, n.1, p.71-77.
- 31 SONER, B. (2006). Microstructural properties of SiC based hardfacing on low alloy steel. **Surface & Coatings Technology**, v.200, n.12-13, p.3734-3732.
- 32 EROGLUA, M; OZDEMIRB, N. (2002). Tungsten-inert gas surface alloying of a low carbon steel. **Surface & Coatings Technology**, v.154, n.2-3, p.209-217.
- 33 WANG, X.H. et al. (2006). In situ production of Fe–TiC surface composite coatings by tungsten-inert gas heat source. **Surface & Coatings Technology**, v.200, n.20-21, p.6117–6122.
- 34 WANG, Z.T. et al. (2008). Microstructure and formation mechanism of in-situ TiC–TiB₂/Fe composite coating. **Transactions Nonferrous Metals Society of China**, v.18, n.4, p.831-835.
- 35 SON BOYTOZ, S.; ULUTAN, M.; YILDIRIM, M.M. (2005). Dry sliding wear behavior of TIG welding clad WC composite coatings. **Applied Surface Science**, v.252, n.5, p.1313–1323.
- 36 BUYTOZ, S.; ULUTAN, M. (2006). In situ synthesis of SiC reinforced MMC surface on AISI 304 stainless steel by TIG surface alloying. **Surface & Coatings Technology**, v.200, n.12-13, p.3698-3704.
- 37 LIN, Y.C.; LIN, Y. CHING; CHEN, Y.C. (2012). Evolution of the microstructure and tribological performance of Ti–6Al–4V cladding with TiN powder. **Materials and Design**, v.36, p.584–589

- 38 MRIDHA, S. et al. (2001). Intermetallic coatings produced by TIG surface melting. **Journal of Materials Processing Technology**, v.113, n.1-3, p.516-520.
- 39 MRIDHA, S. (2005). Titanium nitride layer formation by TIG surface melting in a reactive environment. **Journal of Materials Processing Technology**, v.168, n.3, p.471-477.
- 40 LEE, M.W. et al. (2003). Study on the cavitation erosion behavior of hardfacing alloys for nuclear power industry. **Wear**, v.255, n.1-6, p.157-161.
- 41 CHAKRABORTY, G. et al. (2010). Study of magnetism in colmonoy-6 (AWS NiCr-C) deposit on 316LN stainless steel. **Materials Science and Engineering: B**, v.170, n.1-3, p.133-138.
- 42 SCOTTI, A. (2008). As Vantagens e os limites atuais da solda a plasma. **Noticiário de Equipamentos Industriais**, 2008. Disponível em: <<http://www.nei.com.br/artigos/artigo.aspx?i=67>> Acesso em: 2 abr. 2012.
- 43 ASM Handbook. Ohio: ASM International, 1993. v.6.
- 44 SILVA, R. H. G. (2010). **Inovações em Equipamentos e em Parametrização no Processo de Revestimento por Plasma-Pó (PTA-P)**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- 45 SILVÉRIO, R.B.; PAREDES, R.S.C.; D'OLIVEIRA, A.S.C.M. (2003). Iron Aluminide development using plasma transferred arc coating process. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANICAL ENGINEERING, 17, 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABCM, 2003.
- 46 DÍAZ, V.V.; DUTRA, J.C.; D'OLIVEIRA, A.S.C.M. (2010). Deposição por plasma com arco transferido. **Revista Soldagem & Inspeção**, v.15, n.1, p.41-51.
- 47 SANTOS, L.R.C. **Deposição por plasma de arco transferido com corrente contínua pulsada**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.
- 48 TAKANO, E.H.; QUEIROZ, D.; D'OLIVEIRA, A.S.C.M. (2008). Avaliação dos parâmetros de processamento por PTA nas superfícies processadas. **Soldagem & Inspeção**, v.13, n.3, p. 210-218.
- 49 D'OLIVEIRA, A.S.C.M.; PAREDES, R.S.C.; SANTOS, R.L.C. Pulsed current plasma transferred arc hardfacing. **Journal of Materials Processing Technology**, v.171, n.2, p.167-174.
- 50 D'OLIVEIRA, A.S.C.M.; ALMEIDA, V. (2004). Ni/Al intermetallics plasma transferred arc processing. **Transactions of Materials and Heat treatment**, v.25, n.5, p. 948-951.

- 51 BAZZI, G.D.; D'OLIVEIRA, A.S.C.M. (2006). Efeito da adição de Cr e Nb no desenvolvimento de Intermetálicos de Fe-Al in-situ. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17, 2006, Foz de Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: S.n., 2006.
- 52 D'OLIVEIRA, A.S.C.M.; CRISTO, A.; VAZ, D.S. (2008). Evaluation of intermetallic coatings processed by PTA. In: INTERNATIONAL THERMAL SPRAY CONFERENCE, 2008, Orlando. **Anais...** Orlando: Society for Experimental Mechanics Inc., 2008. p.1090-1094.
- 53 HOU, Q.Y.; GAO, J.S.; ZHOU, F. (2005). Microstructure and wear characteristics of cobalt-based alloy deposited by plasma transferred arc weld surfacing. **Surface and Coatings Technology**, v.194, n.2-3, p.238-243.
- 54 HOU, Q.; HUANG, Z.; GAO, J. (2007). Effects of Y_2O_3 on the microstructure and wear resistance of cobalt-based alloy coatings deposited by plasma transferred arc process. **Rare Metals**, v.26, n.2, p.103-109. Disponível em <<http://www.docin.com/p-411539985.html>>. Acesso em: 05 abr. 2012.
- 55 HUNG, F.Y. et al. (2006). Microstructural characteristics of PTA-overlaid NbC on pure Ti. **Surface and Coatings Technology**, v.200, n.24, 6881-6887.
- 56 BRACARENSE, A. Q. (2013). **Soldagem a Laser**. S.l: Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: <<ftp://novell.demec.ufmg.br/lrssi/ProcessosSoldagemPos/TEXTOS/21TextoSoldagemLASER.pdf>>. Acesso em: 13 abr. 2012.
- 57 LIN, W.C.; CHEN, C. (2006). Characteristics of thin surface layers of cobalt-based alloys deposited by laser cladding. **Surface & Coatings Technology**, v.200, p.4557-4563.
- 58 RESENDE, A. A. et al. (2009). Influencia das correntes de soldagem do processo Plasma-MIG sobre a geometria do cordão de solda e taxa de fusão do arame. **Soldagem & Inspeção**, v.14, n.4, p.320-328.
- 59 WILLEMS, G.A.M. (1980). **Method of and device for plasma MIG welding**. US n. PI 4234779 A, 19 dec. 1977, 18 nov. 1980.
- 60 SILVA, R.H.G.; DUTRA, J.C. **Processo PTA-P** – uma revisão da literatura como base para inovações: parte 2 de 2: comportamento térmico e cinemático do pó, parâmetros e consumíveis do processo, v.17, n.2. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/si/v17n2/11.pdf>>. Acesso em: 2 out. 2012.
- 61 DIAZ, V. M. V. (2005). **Inovação do equipamento e avaliação do processo plasma de arco transferido alimentado com pó (PTAP) para soldagem fora de posição**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- 62 UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO; UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. MOSELLI, P.C.; OLIVEIRA, M.F. **Dispositivo de Revestimento de**

Superfícies Metálicas e sua Montagem. BR n. PI 10 2013 001677-2, 23 jan. 2013.

- 63 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM ISO 6507-1/08. Materiais metálicos - Ensaio de dureza Vickers. Parte 1: Método de ensaio.** 2008
- 64 TAKEYAMA, R.R. (2005). **Caracterização de revestimentos de ligas a base de Co modificadas pela adição de carbonetos de tungstênio.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- 65 YAEDU, A.E. (2003). **Influência do substrato na deposição de stellite 1 com Plasma de Arco Transferido.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.
- 66 BALASUBRARNANIAN, V. et al. (2009). Application of response surface methodology to prediction of dilution in plasma transferred arc hardfacing of stainless steel on carbon steel. **Journal of Iron and Steel Research, International**, v.16, n.1, p.44-53.
- 67 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G65-91.** Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus, S.I., 1991.
- 68 Fonseca, M. A. et al. Efeito do insumo de calor na microestrutura da solda do aço NTU-SAR50 pelo processo a arco submerso. Disponível em: <http://www.unilestemg.br/revistaonline/volumes/02/downloads/artigo_10.pdf>. Acesso em: 22 out. 2013.
- 69 KASHANI, H. et al. (2008). The Influence of volumetric dilution on the strain induced $\gamma \rightarrow \epsilon$ martensitic transformation in GTAW processed Co–Cr–Mo alloy. **Materials Science and Engineering: A**, v.478, n.1-2, p.38–42.