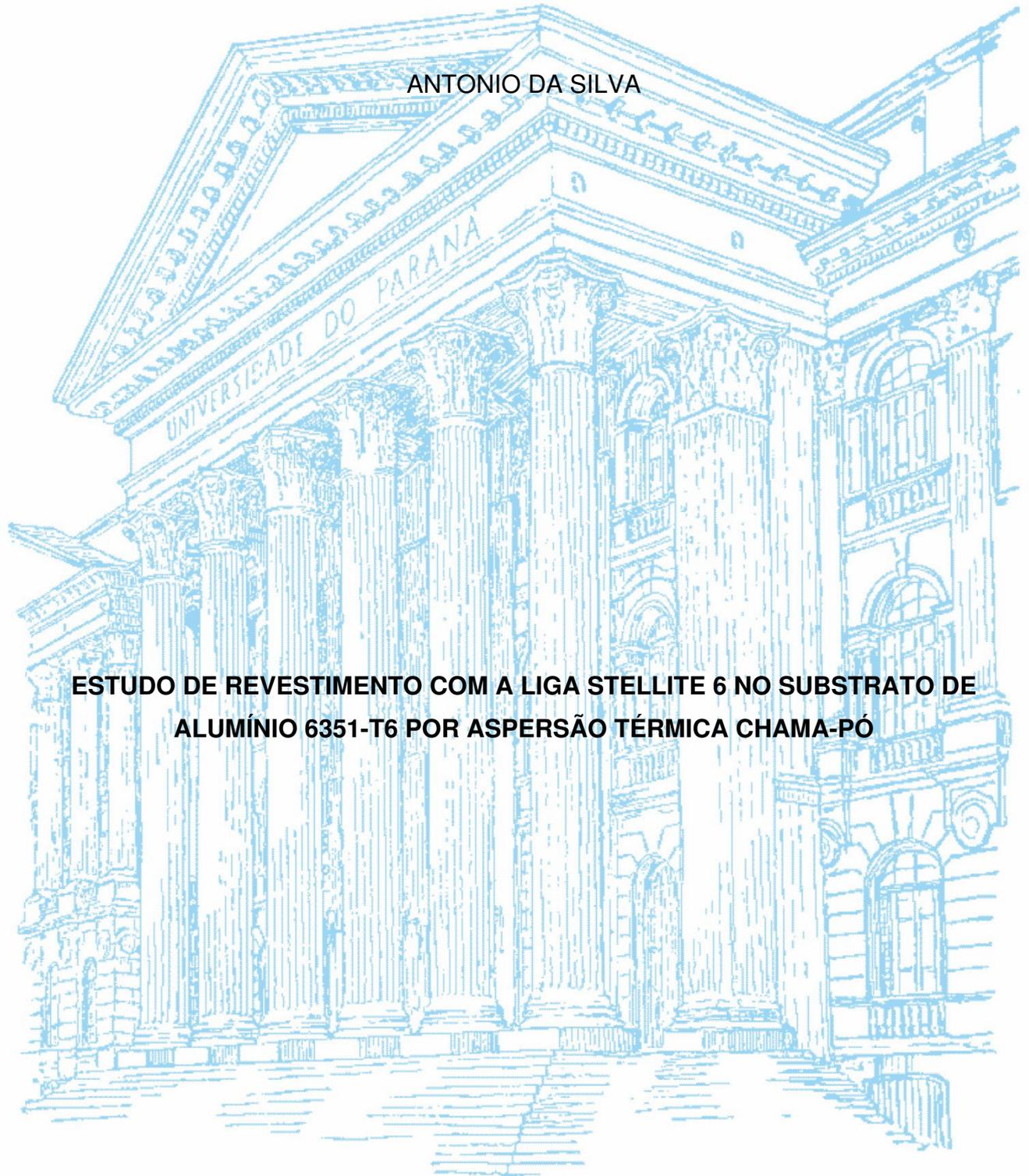


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANTONIO DA SILVA



ESTUDO DE REVESTIMENTO COM A LIGA STELLITE 6 NO SUBSTRATO DE ALUMÍNIO 6351-T6 POR ASPERSÃO TÉRMICA CHAMA-PÓ

CURITIBA

2017

ANTONIO DA SILVA

**ESTUDO DE REVESTIMENTO COM A LIGA STELLITE 6 NO SUBSTRATO DE
ALUMÍNIO 6351-T6 POR ASPERSÃO TÉRMICA CHAMA-PÓ**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, na área de concentração Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Ramón Sigifredo Cortés Paredes

CURITIBA

2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS/UFPR
BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

SI586e Silva, Antonio da
Estudo de revestimento com a liga stellite 6 no substrato de alumínio 6351-T6 por aspersão
térmica chama-pó / Antonio da Silva. – Curitiba, 2017.
110 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica, 2017.

Orientador: Ramón Sigifredo Cortés Paredes.

1. Chama-pó. 2. Stellite 6. 3. Porosidade. 4. Aderência. 5. Desgaste. I. Universidade
Federal do Paraná. II. Cortés Paredes, Ramón Sigifredo. III. Título.

CDD: 620.1



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
MECÂNICA

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA MECÂNICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ANTONIO DA SILVA** intitulada: **ESTUDO DE REVESTIMENTO COM A LIGA STELLITE 6 NO SUBSTRATO DE ALUMÍNIO 6351-T6 POR ASPERSÃO TÉRMICA CHAMA-PÓ** após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 24 de Novembro de 2017.



RAMON SIGIFREDO CORTES PAREDES
Presidente da Banca Examinadora



JULIO CÉSAR GIUBILEI MILAN
Avaliador Externo



REGINA MARIA HARTOG POMBO RODRIGUEZ
Avaliador Externo



GUSTAVO BAVARESCO SUCHARSKI
Avaliador Externo



SIDNEI ANTONIO PIANARO
Avaliador Externo

Dedico este trabalho à minha adorável esposa Simone, aos meus filhos Bruno e Felipe, aos meus pais Nilton e Zilda, pelo apoio e amor incondicional. Ao meu falecido tio Antonio José.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos ao professor e orientador Dr. Eng. Ramón S. C. Paredes, pela competência, dedicação e colaboração neste trabalho. Agradeço por ter acreditado no desenvolvimento desta pesquisa.

A minha esposa, Simone, por sempre me apoiar e estar junto nos momentos mais difíceis e dar a força necessária para conclusão desta obra.

Aos meus filhos por estarem incondicionalmente do meu lado e de forma indireta colaboraram com esta pesquisa.

Ao Professor Dr. Gustavo Sucharki, pela participação neste trabalho e ajuda total nos laboratórios UFPR e desenvolvimento desta pesquisa.

Aos Professores Dr. Júlio e Msc. Ivandro, pela dedicação e colaboração neste trabalho. Agradeço principalmente pelo apoio aos testes realizado na UDESC.

Ao Luis Gustavo do Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), pela disposição e apoio aos ensaios do MEV e EDS.

Ao Professor Dr. Sergio Henke por permitir acesso ao laboratório de ensaio de dureza e microscópio ótico.

Ao Edson e Metz por me ajudarem nos ensaios de microdureza, microscopia ótica e metalografia.

Agradeço à minha mãe, Zilda e meu pai Nilton por terem me apoiado e incentivado a concluir mais esta etapa.

Agradeço aos colegas e amigos de laboratório que me ajudaram nos ensaios, Pedro, Jonathan, Watena, Samantha, Bruno, Caio, Felipe, Larisa, Caroline Fernando, Igor.

Ao Professor Dr. Dalberto, do Laboratório de Usinagem, por permitir usar suas máquinas de usinagem.

A felicidade não se resume na ausência de problemas, mas sim na sua capacidade de lidar com eles.

(Albert Einstein)

RESUMO

Aspersão térmica é uma técnica de produção de revestimentos moderna e versátil com vasta aplicação industrial, a qual desempenha uma função importante na proteção de superfícies e recuperação de peças contra desgaste e corrosão. Os revestimentos metálicos depositados por aspersão térmica apresentam diferentes microestruturas de acordo com o tipo de processo e parâmetros de aplicação, para tanto podem modificar algumas propriedades mecânicas, ou seja, melhorar o desempenho, por exemplo, em relação ao desgaste por deslizamento, para o mesmo material aspergido. Neste contexto, foi utilizado o revestimento metálico (stellite 6) por apresentar ótimo desempenho na redução de desgaste em metal base e/ou peças, sendo depositado pelo processo chama-pó que possibilita flexibilidade na parametrização. Neste trabalho o objetivo foi avaliar a deposição de revestimento metálico, aspergidos pelo processo chama-pó no substrato de alumínio 6351-T6. A pesquisa avaliou a influência dos parâmetros de processo chama-pó, como distância da tocha, pré-aquecimento, fluxo do oxigênio e acetileno, gás de transporte nitrogênio, taxa de alimentação do pó e pressão do oxigênio. Para estudo da influência dos parâmetros no processo chama-pó, utilizou-se metodologia Taguchi, com uma abordagem de matriz ortogonal L8. A adesão do revestimento no substrato, resistência ao desgaste por deslizamento, porosidade, teor de óxidos e microdureza foram avaliados. Experimentalmente, os resultados apresentam eficácia na redução de desgaste por deslizamento, aumento na aderência e também redução na porosidade do revestimento. O pré-aquecimento em 120 °C elevou a aderência dos revestimentos stellite 6 no Al 6351-T6, em média de 20,2 MPa. O parâmetro taxa de alimentação otimizado em 75 g/min reduziu o número de partículas parcialmente fundidas nas camadas aspergidas de stellite 6, desta forma aumentou a resistência ao desgaste por deslizamento nos revestimentos.

Palavras-chave: Chama-pó. Stellite 6. Porosidade. Aderência. Desgaste.

ABSTRACT

Thermal spraying is a modern and versatile coating production technique with wide industrial application, which plays an important role in protecting surfaces and recovering parts from wear and corrosion. The metallic coatings deposited by thermal spraying have different microstructures according to the type of process and application parameters, in order to modify some mechanical properties, ie, to improve the performance, for example, in relation to sliding wear, for the same sprayed material. In this context, the metal coating (stellite 6) was used because of its excellent performance in the reduction of wear on base metal and parts, being deposited by powder flame spraying process that allows flexibility in parameterization. In this work the objective was to evaluate the deposition of metallic coating (stellite 6) by powder flame spraying process on 6351-T6 aluminum alloy. In this research, was evaluated the influence of powder flame spraying process parameters, as standoff distance, preheating, oxygen and acetylene flow, carrier gas flow, powder feed rate and oxygen pressure in the alloy deposited on aluminum Al 6351-T6. To study the influence of the parameters the Taguchi design of experiment, with orthogonal matrix L8 was used. Coating adhesion to the substrate, sliding wear resistance, porosity, oxide content and microhardness were evaluated. Experimentally, the results show efficacy in the reduction of wear, increase in adhesion and also reduction in the porosity of the coating. Preheating at 120 °C raised the adhesion of stellite 6 coatings to Al 6351-T6, averaging 20,2 MPa. The powder feed rate parameter of 75 g/min reduced the number of partially molten particles in the stellite 6 spraying layers, thereby increasing sliding wear resistance in the coatings.

Key-words: Powder flame spraying. Stellite 6. Porosity. Adhesion. Wear.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – REVESTIMENTO DE STELLITE 6 APLICADA EM 3 CAMADAS.....	25
FIGURA 2 – MICROESTRUTURA DO REVESTIMENTO DA LIGA DE COBALTO (1256) APLICADO EM SUBSTRATO (Al) [MEV].	26
FIGURA 3 – MICROESTRUTURA DO TUBO EXTRUDADO Al 6351-T6.....	28
FIGURA 4 – ESQUEMA DA PISTOLA E DEPOSIÇÃO DO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA	32
FIGURA 5 – ESQUEMA DO REVESTIMENTO DEPOSITADO POR ASPERSÃO TÉRMICA	33
FIGURA 6 – BICO DA PISTOLA PARA CHAMA-PÓ.	34
FIGURA 7 – BICO DA PISTOLA PARA CHAMA-ARAME.....	35
FIGURA 8 – BICO DA PISTOLA PARA ARCO ELÉTRICO	35
FIGURA 9 – BICO DA PISTOLA PARA HVOF	36
FIGURA 10 – TIPOS DE MECANISMOS DE DESGASTES.	41
FIGURA 11 – TIPOS DE AMBIENTES DE CONTATO NO CICLO DE DESGASTE DOS SISTEMAS: (A) 2-CORPOS ABERTO; (B) 2-CORPOS FECHADO; (C) 3-CORPOS ABERTO.	42
FIGURA 12 – (A) ABRASÃO A BAIXA TENSÃO; (B) ABRASÃO	43
FIGURA 13 – MECANISMOS DE DESGASTE ABRASIVO.....	44
FIGURA 14 – (A) PINO-SOBRE-DISCO; (B) PINO-SOBRE-PLACA; (C) PINO-SOBRE-CILINDRO; (D) RODA DE BORRACHA; (E) CÁLCULO DA ÁREA COM DESGASTE POR CONFOCAL.	46
FIGURA 15 – EQUIPAMENTO PARA ENSAIO MICROABRASIVO.	47
FIGURA 16 – TIPOS DE AMOSTRAS PARA: (A) ENSAIO DE DOBRAMENTO E CARACTERIZAÇÃO; (B) ENSAIO DE TRAÇÃO; (C) ENSAIO PINO-SOBRE-DISCO.	49
FIGURA 17 – (A) PISTOLA DE ASPERSÃO; (B) ALIMENTADOR DE PÓ.....	50
FIGURA 18 – FLUXOGRAMA EXPERIMENTAL DA PESQUISA.	51
FIGURA 19 – “THRESHOLD” PARA DETERMINAR O PERCENTUAL DE POROS E ÓXIDOS.	55
FIGURA 20 – PADRÕES PARA AVALIAÇÃO POR CONTROLE VISUAL DOS ENSAIOS DE ADERÊNCIA POR DOBRAMENTO: (A) IDEAL; (B) MARGINAL; (C) REJEITADA.....	57

FIGURA 21 – MODELO DE ENSAIO POR DESLIZAMENTO PINO-SOBRE-DISCO	58
FIGURA 22 – TRIBÔMETRO PARA ENSAIO DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO.	59
FIGURA 23 – MEDIÇÃO DA PISTA DE DESGASTE: (A) DETALHE DOS PONTOS MEDIDOS EM CADA AMOSTRA; (B) ÁREA DE DESGASTE EXTRAIDA POR MEDIÇÃO DO CONFOCAL.	60
FIGURA 24 – MAPEAMENTO QUÍMICO POR EDS DO REVESTIMENTO (F7).....	63
FIGURA 25 – ANÁLISE POR EDS PONTUAL DO REVESTIMENTO (F7).....	64
FIGURA 26 – MAPEAMENTO QUÍMICO POR EDS DO REVESTIMENTO (F1).....	64
FIGURA 27 – MAPEAMENTO QUÍMICO DO REVESTIMENTO APÓS ENSAIO DE ADESÃO (F7).....	65
FIGURA 28 – MAPEAMENTO QUÍMICO DO SUBSTRATO (F7)	65
FIGURA 29 – SECÇÃO TRANSVERSAL DAS MORFOLOGIAS DOS REVESTIMENTOS COM DIFERENTES PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO (F1-F4)	67
FIGURA 30 – SECÇÃO TRANSVERSAL DAS MORFOLOGIAS DOS REVESTIMENTOS COM DIFERENTES PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO (F5-F8)	67
FIGURA 31 – ANÁLISE DE ENSAIO DE ADERÊNCIA POR TRAÇÃO: (A) 1F5 – FALTA DE COLA; (B) 2F8 – FALTA DE COLA; (C) 1F3 – FALTA DE COLA; (D) 3F3 – FRATURA 60 % NO ADESIVO; (E) 2F5 – FRATURA 100 % ADESIVA NA INTERFACE REVESTIMENTO/SUBSTRATO.	77
FIGURA 32 – ENSAIO DE DOBRAMENTO: (F1) MARGINAL [GRAU MÉDIO 6,5]; (F2) MARGINAL [GRAU MÉDIO 5]; (F3) IDEAL [GRAU MÉDIO 11]; (F4) IDEAL [GRAU MÉDIO 12,5].	82
FIGURA 33 – ENSAIO DE DOBRAMENTO: (F5) REJEITADO [GRAU MÉDIO 2]; (F6) MARGINAL [GRAU MÉDIO 7]; (F7) MARGINAL [GRAU MÉDIO 8]; (F8) MARGINAL [GRAU MÉDIO 8,5].....	82
FIGURA 34 – ANÁLISE DE DESGASTE PINO-SOBRE-DISCO	87
FIGURA 35 – ANÁLISE DE POROSIDADE E TEOR DE ÓXIDOS DO EXPERIMENTO (F9).....	94
FIGURA 36 – CAMADAS REVESTIDAS EM (Al 50 X 75 mm).	104
FIGURA 37 – CAMADAS REVESTIDAS EM (Al Φ 25,4 X 35 mm).....	104
FIGURA 38 – DISPOSITIVO UTILIZADO PARA FIXAÇÃO E CURA DA COLA.....	105
FIGURA 39 – SISTEMA DE FIXAÇÃO DAS AMOSTRAS.	105

FIGURA 40 – MODOS DE FALHA DO REVESTIMENTO (ADERÊNCIA)	106
FIGURA 41 – MODOS DE FALHA DO ENSAIO PRELIMINAR (ADERÊNCIA)	107

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA X DUREZA NO STELLITE 6	26
GRÁFICO 2 – DADOS DE DESGASTE ABRASIVO DE DIFERENTES MATERIAIS.	27
GRÁFICO 3 – DIAGRAMA PSEUDO-BINÁRIO Al-Mg ₂ Si.	29
GRÁFICO 4 – CURVAS DE TRATAMENTO TÉRMICO AL6061.....	30
GRÁFICO 5 – EM (A) TENSÃO DE ESCOAMENTO X TEMPERATURA; (B) ELONGAMENTO X TEMPERATURA; (C) TENSÃO À RESISTÊNCIA DE TRAÇÃO X TEMPERATURA.....	30
GRÁFICO 6 – INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA BAIXA (SÉRIE-6000)	31
GRÁFICO 7 – ALTURA DOS ELEMENTOS DE PERFIS Ra E Rz.	37
GRÁFICO 8 – INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE JATEAMENTO VERSUS (Ra).....	38
GRÁFICO 9 – INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA DE JATEAMENTO VERSUS (Ry).	38
GRÁFICO 10 – ENSAIO MICROABRASIVO	47
GRÁFICO 11 – BOXSPLOT PARA OS RESULTADOS DE POROSIDADE	68
GRÁFICO 12 – EFEITOS PRINCIPAIS SOBRE AS MÉDIAS DO PERCENTUAL DE POROSIDADE.	71
GRÁFICO 13 – BOXSPLOT PARA OS RESULTADOS DE TEOR DE ÓXIDOS.....	73
GRÁFICO 14 – EFEITOS PRINCIPAIS SOBRE AS MÉDIAS DO TEOR DE ÓXIDOS.	75
GRÁFICO 15 – BOXSPLOT PARA OS RESULTADOS DE ADERÊNCIA POR TRAÇÃO.	78
GRÁFICO 16 – EFEITOS PRINCIPAIS SOBRE AS MÉDIAS DA ADERÊNCIA POR TRAÇÃO.	80
GRÁFICO 17 – BOXSPLOT PARA OS RESULTADOS DE ADERÊNCIA POR DOBRAMENTO.....	83
GRÁFICO 18 – EFEITOS PRINCIPAIS SOBRE AS MÉDIAS DA ADERÊNCIA POR DOBRAMENTO.....	85
GRÁFICO 19 – BOXSPLOT PARA OS RESULTADOS DE DESGASTE.	88
GRÁFICO 20 – EFEITOS PRINCIPAIS SOBRE AS MÉDIAS DO PERCENTUAL DE DESGASTE.....	90
GRÁFICO 21 – PERFIL DE MICRODUREZA VICKERS DOS SUBSTRATOS DE AL6351-T6.....	92

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – FATORES DE CONTROLE.....	52
QUADRO 2 – FATORES (RESPOSTAS).....	52
QUADRO 3 – CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DOS ENSAIOS DE DOBRAMENTO.	57
QUADRO 4 – AVALIAÇÃO QUALIQUANTITATIVO DOS ENSAIOS DE DOBRAMENTO.....	57
QUADRO 5 – PARÂMETROS UTILIZADOS NO ENSAIO DE DESGASTE.	59
QUADRO 6 – RUGOSIDADE DO SUBSTRATO E ESPESSURA DOS REVESTIMENTOS ASPERGIDOS PARA OS ENSAIOS DE DOBRAMENTO.....	61
QUADRO 7 – RUGOSIDADE DO SUBSTRATO E ESPESSURA DOS REVESTIMENTOS ASPERGIDOS PARA OS ENSAIOS DE ADERÊNCIA POR TRAÇÃO.	62
QUADRO 8 – HIPÓTESES PARA CADA FATOR NO ARRANJO L8 DO TAGUCHI.	69
QUADRO 9 – TESTE DE COMPARAÇÃO PELO MÉTODO DE TUKEY PARA POROSIDADE.	71
QUADRO 10 – TESTE DE COMPARAÇÃO PELO MÉTODO DE TUKEY PARA TEOR DE ÓXIDOS.	76
QUADRO 11 – MÉTODO DE TUKEY (COMPARAÇÃO) PARA ADERÊNCIA TRAÇÃO.	81
QUADRO 12 – TESTE DE COMPARAÇÃO PELO MÉTODO DE TUKEY PARA ADERÊNCIA.	86
QUADRO 13 – RESULTADOS DAS ESPESSURAS E PROFUNDIDADE DOS REVESTIMENTOS.....	87
QUADRO 14 – TESTE DE COMPARAÇÃO PELO MÉTODO DE TUKEY PARA DESGASTE.....	90
QUADRO 15 – DUREZA DOS REVESTIMENTOS.....	93

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PROPRIEDADES DA LIGA STELLITE 6.....	27
TABELA 2 – PROPRIEDADES DAS LIGAS AL 6351-T6 E 6061-T6.....	31
TABELA 3 – COMPOSIÇÃO QUIMÍCA DA LIGA DE ALUMÍNIO 6351 (% PESO)...	48
TABELA 4 – COMPOSIÇÃO QUIMÍCA DA LIGA STELLITE 6 (% PESO).....	48
TABELA 5 – FATORES PARA DEPOSIÇÃO DO SF6 POR (FS).....	52
TABELA 6 – NÍVEIS E FATORES NO ARRANJO L8 TAGUCHI PARA DEPOSIÇÃO DO SF6.	53
TABELA 7 – FAIXA E CAMADA MÍNIMA DE APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO. ..	53
TABELA 8 – RESULTADOS DE POROSIDADE PARA AS AMOSTRAS (L8 DO TAGUCHI).....	68
TABELA 9 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA POROSIDADE PARA OS FATORES, COM NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA DE 95 %.	70
TABELA 10 – RANQUE DE INFLUÊNCIA DOS FATORES PARA A POROSIDADE MÉDIA.....	70
TABELA 11 – RESULTADOS DA FRAÇÃO DE ÓXIDOS PARA AS AMOSTRAS (L8 DO TAGUCHI).....	73
TABELA 12 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO TEOR DE ÓXIDOS PARA OS FATORES, COM NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA DE 95 %.	74
TABELA 13 – RANQUE DE INFLUÊNCIA DOS FATORES PARA A MÉDIA DO TEOR DE ÓXIDOS.	75
TABELA 14 – RESULTADOS DA ADERÊNCIA POR TRAÇÃO NO ARRANJO L8 TAGUCHI.	78
TABELA 15 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA ADERÊNCIA POR TRAÇÃO PARA OS FATORES, COM NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA DE 95 %.	79
TABELA 16 – RANQUE DE INFLUÊNCIA DOS FATORES PARA A ADERÊNCIA TRAÇÃO MÉDIA.	80
TABELA 17 – RESULTADOS DA ADERÊNCIA POR DOBRAMENTO PARA ARRANJO I8 TAGUCHI.	83
TABELA 18 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA ADERÊNCIA POR DOBRAMENTO PARA OS FATORES, COM NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA DE 95 %.	84
TABELA 19 – RANQUE DE INFLUÊNCIA DOS FATORES PARA A ADERÊNCIA MÉDIA.....	85

TABELA 20 – RESULTADOS DE DESGASTE PARA AS AMOSTRAS (L8 DO TAGUCHI).....	88
TABELA 21 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO VOLUME DE DESGASTE PARA OS FATORES, COM NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA DE 95 %.....	89
TABELA 22 – RANQUE DE INFLUÊNCIA DOS FATORES PARA O DESGASTE MÉDIO.....	89
TABELA 23 – RESUMO DOS RESULTADOS DA ANÁLISE DE PARÂMETROS.....	92
TABELA 24 – PARÂMETROS UTILIZADOS NO EXPERIMENTO DE CONFIRMAÇÃO.....	93
TABELA 25 – RESULTADOS COM O REVESTIMENTO DE CONFIRMAÇÃO (F9).....	94
TABELA 26 – ANÁLISE DE TENSÃO DE ADERÊNCIA DOS EXPERIMENTOS.....	106
TABELA 27 – PARÂMETROS DE TESTES PRELIMINARES DE ADESÃO.....	107
TABELA 28 – VALORES DE ADESÃO PARA ASPERSÃO TÉRMICA.....	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
Alim.	- Alimentação
Amb.	- Ambiente
ASM	- <i>American Society for Metals</i>
ASTM	- <i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	- <i>American Welding Society</i>
EDS	- Espectroscopia por Energia Dispersiva
FS	- <i>Flame-Spray</i> (chama pó ou chama arame)
HVOF	- <i>High Velocity Oxygen Fuel</i> (oxi-combustível de alta velocidade)
Preaque.	- Pré-aquecimento
MEV	- Microscópio Eletrônico de Varredura
Mil.	- Militar
MO	- Microscópio Óptico
NBR	- Norma Brasileira
SABESP	- Companhia Saneamento Básico do Estado São Paulo
Std.	- Standard
Temp.	- Temperatura
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
UDESC	- Universidade do Estado de Santa Catarina
UFU	- Universidade Federal de Uberlândia

LISTA DE SÍMBOLOS

@ - arroba

® - marca registrada

Σ - somatório de números

Π - produtório de números

π - cálculo de perímetro de circunferência

Φ - representa o diâmetro

μ - micro

m - mili

K - kilo

GPa - giga Pascal

MPa - mega Pascal

rpm - rotação por minuto

Si - silício

Co - cobalto

Mg - magnésio

Cu - cobre

Al - alumínio

Cr - cromo

W - tungstênio

Ni - níquel

Fe - ferro

Mo - molibdênio

N_2 - nitrogênio

O_2 - oxigênio

H - hidrogênio

C - carbono

C_2H_2 - acetileno

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	JUSTIFICATIVA.....	22
1.2	OBJETIVOS	23
1.2.1	Objetivo Geral.....	23
1.2.2	Objetivos Específicos	23
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	24
2.1	LIGA DE COBALTO (STELLITE).....	24
2.1.1	Propriedades físicas, químicas e mecânicas.....	24
2.1.2	Stellite 6.....	25
2.2	LIGA DE ALUMÍNIO 6351-T6.....	28
2.2.1	Propriedades físicas, químicas e mecânicas.....	28
2.3	ASPERSÃO TÉRMICA.....	31
2.3.1	Processos de Aspersão Térmica	33
2.3.1.1	Chama convencional.....	34
2.3.1.2	Processo chama-pó.....	34
2.3.1.3	Chama-Arame	34
2.3.1.4	Arco elétrico.....	35
2.3.1.5	Oxicombustível de alta velocidade (HVOF)	36
2.3.2	Preparação do substrato por jateamento superficial.....	36
2.3.3	Rugosidade superficial	37
2.3.4	Tensão de aderência	39
2.3.5	Porosidade	39
2.3.6	Óxidos	40
2.4	DESGASTE	40
2.4.1	Mecanismo de desgaste por deslizamento.....	41
2.4.1.1	Desgaste abrasivo	42
2.4.1.2	Desgaste adesivo	44
2.4.1.3	Desgaste por fadiga.....	44
2.4.2	Desgaste por impacto.....	45
2.4.3	Desgaste por rolamento	45
2.4.4	Métodos de ensaio de desgaste: por deslizamento e por abrasão	45
2.4.5	Avaliação da resistência ao desgaste em revestimento aspergido	46

3	MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1	MATERIAIS	48
3.2	CONFIGURAÇÃO DAS AMOSTRAS	49
3.3	EQUIPAMENTOS	49
3.4	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	50
3.5	TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS	54
3.5.1	Análise química por EDS	54
3.5.2	Análise de microestrutura e morfologia	55
3.5.2.1	Quantificação de poros e óxidos	55
3.5.3	Análise estatística do planejamento Taguchi	56
3.5.4	Ensaio de aderência	56
3.5.4.1	Ensaio de aderência por tração	56
3.5.4.2	Ensaio de aderência por dobramento	57
3.5.5	Ensaio de desgaste	58
3.5.6	Ensaio de microdureza	60
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	61
4.1	ANÁLISE DA RUGOSIDADE E ESPESSURA DO REVESTIMENTO	61
4.2	ANÁLISE QUÍMICA POR EDS	62
4.3	ANÁLISE DE MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS	66
4.3.1	Quantificação de poros e fração de óxidos	68
4.3.1.1	Porosidade	68
4.3.1.2	Fração de óxidos	72
4.4	ANÁLISE DO ENSAIO DE ADERÊNCIA POR TRAÇÃO	76
4.5	ANÁLISE DO ENSAIO DE ADERÊNCIA POR DOBRAMENTO	81
4.6	ANÁLISE DO ENSAIO DE DESGASTE	86
4.7	RESULTADOS DA ANÁLISE DE PARÂMETROS	91
4.8	ANÁLISE DO ENSAIO DE MICRODUREZA	92
4.9	PARÂMETROS OTIMIZADOS E TESTE DE CONFIRMAÇÃO	93
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	97
	REFERÊNCIAS	98
	GLOSSÁRIO	103
	APÊNDICE A – APLICAÇÃO DAS CAMADAS DE REVESTIMENTOS	104
	APÊNDICE B – TESTE PRELIMINAR DE ADERÊNCIA	105

ANEXO A – CERTIFICADO MATERIAL STELLITE 6	109
ANEXO B – TABELA DE EQUIVALÊNCIA (MM PARA MESH).....	110
ANEXO C – LIMPEZA COM JATEAMENTO ABRASIVO AO METAL BRANCO .	111

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, os materiais têm evoluído de forma significativa em características como o peso, resistência mecânica e a corrosão, devido às necessidades da indústria aeronáutica, petroquímica, automobilística e naval, entre outras. Dentre os materiais em constante desenvolvimento, as ligas de alumínio demonstram uma boa resposta aos requisitos de projeto, no entanto, apresentam limitações quanto à resistência ao desgaste (KUMAR, *et al.*, 2010; RAMNATH, *et al.*, 2014; SHABEL; GRANGER; TRUCKNER, 1992).

Desta forma, a engenharia de superfícies empenha-se em desenvolver técnicas e métodos cujo objetivo é melhorar o desempenho no que tange a resistência ao desgaste e corrosão, em especial sobre o alumínio. A aspensão térmica é um processo de deposição de revestimentos protetores utilizada em diversas áreas da engenharia. Sua versatilidade na aplicação de vários materiais de revestimento faz desta tecnologia uma das mais importantes soluções frente ao desgaste e à corrosão (TUCKER, 1994).

A aspensão térmica é basicamente caracterizada pela forma com que a geração de energia térmica é transferida ao pó ou arame, proveniente de dois principais grupos: combustão de misturas de gases e aquecimento dos gases por reações elétricas. As camadas de revestimentos são formadas pelo ancoramento mecânico do material aspergido na superfície do substrato (LIMA; TREVISAN, 2007).

Os materiais de revestimentos utilizados para maximizar a resistência ao desgaste no substrato são ligas de metais duros. A liga de cobalto (stellite) é um revestimento usado em deposição, para obter ótimo nível de dureza, excelentes resultados quanto à corrosão e desgaste. Os principais elementos de adição à liga tradicional de cobalto são conhecidos como cromo (Cr), tungstênio (W) e carbono (C) (CROOK, 1992; MACEDO *et al.*, 2006).

Ainda, a morfologia do revestimento é definida por meio de estrutura lamelar característica das camadas aspergidas, constituída pelo material de deposição, vazios/poros e óxidos. Os percentuais de óxidos e vazios/poros formados nos revestimentos são dependentes do processo de aspensão utilizado, oscilam em diferentes regulagens dos parâmetros e também no procedimento de deposição (SUCHARSKI, 2016).

Para que a liga de cobalto seja aplicada de forma eficaz no substrato de alumínio 6351-T6 pelo processo chama-pó, ou seja, obter elevada aderência, baixa porosidade e boa coesão no material depositado, faz-se necessário o estudo da influência dos parâmetros de processo, como por exemplo, os fatores pré-aquecimento e rugosidade que afetam a aderência diretamente do revestimento. (PAREDES; D'OLIVEIRA, 2001; NASCIMENTO; MARIANO; PAREDES, 2007).

1.1 JUSTIFICATIVA

A liga de cobalto, denominada stellite, foi desenvolvida para suportar situações como contato metal-metal não lubrificado, choque de partículas sólidas e erosão por fluido em alta velocidade. Os carbonetos formados na matriz de cobalto garantem uma boa resistência ao desgaste. Ainda, o stellite apresenta excelente resistência à corrosão devido alta porcentagem de cromo solidificado na liga de cobalto (WU; REDMAN, 1994).

Nos experimentos realizados por Macedo *et al.* (2006), os processos de aspersão térmica por chama-pó em baixa e alta velocidade de deposição não afetaram as propriedades mecânicas no substrato da liga de alumínio durante a deposição devido ao aquecimento transferido ao substrato. No trabalho do Macedo o stellite 6 apresentou bom desempenho em relação à dureza e ao desgaste microabrasivo, quando aspergido no substrato de alumínio.

O processo de aspersão térmica chama-pó apresenta um baixo custo na aplicação de camadas protetivas e muita flexibilidade na otimização dos parâmetros de processo (*AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS)*, 1985), desta forma, facilita adequar um conjunto de variáveis, visando melhorar o desempenho de resistência ao desgaste do stellite 6 quando depositado no alumínio 6351-T6.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a influência dos parâmetros do processo de aspersão térmica, de forma a maximizar o desempenho na aderência, resistência ao desgaste por deslizamento, porosidade e teor de óxidos do revestimento stellite 6 quando depositado em superfície da liga de alumínio Al 6351-T6 pelo processo chama-pó.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Estudar a influência da rugosidade do substrato de Al;
- b) Avaliar a influência do pré-aquecimento do substrato sobre a aderência na interface substrato Al/stellite 6;
- c) Verificar mapeamento de composição química dos revestimentos e morfologias;
- d) Determinar a porcentagem de porosidade e teor de óxidos dos revestimentos;
- e) Ensaia a aderência da camada de revestimento no substrato de Al;
- f) Analisar o comportamento dos revestimentos no ensaio de dobramento;
- g) Ensaia a microdureza na camada revestida com stellite 6 e substrato de Al, antes e depois de aplicar as camadas;
- h) Avaliar a resistência ao desgaste dos revestimentos stellite 6.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 LIGA DE COBALTO (STELLITE)

As ligas de cobalto são comercializadas como stellite, tendo como características principais a resistência ao desgaste, à alta temperatura e corrosão. O cobalto é um metal com características e propriedades muito próximas às das ligas de níquel, porém com maior resistência mecânica e um custo ainda mais alto (GEDDES; LEON; HUANG, 2010).

Segundo Klarstrom, Crook e Wu (2004), a liga de cobalto permite diversas aplicações como: superligas de resistência à fluência à alta temperatura, revestimento duro e ligas resistentes ao desgaste, ligas resistentes à corrosão, materiais para ferramentas, entre outras.

2.1.1 Propriedades físicas, químicas e mecânicas

Geddes, Leon e Huang (2010), resumem algumas vantagens da liga de cobalto como: excelente resistência à corrosão, especialmente a temperaturas elevadas (em função da adição de altas quantidades de cromo), exibe melhor soldabilidade do que a liga de níquel e outra vantagem da liga de cobalto é a capacidade de se fundir no ar ou com gás inerte argônio, sendo mais barato do que a fusão a vácuo.

A maioria dos revestimentos stellite são à base de cobalto, com elementos de liga de Cr, C, W e/ou Mo. Além disso, as ligas stellite são resistentes à cavitação, corrosão, erosão, abrasão e ao desgaste por deslizamento. Geralmente, as ligas com baixo teor de carbono são utilizadas em aplicações de cavitação, desgaste por deslizamento ou por contato metal-metal moderado. Normalmente, com alto teor de carbono são indicados para desgaste por abrasão e erosão de baixo ângulo de ataque (DELORO, 2008).

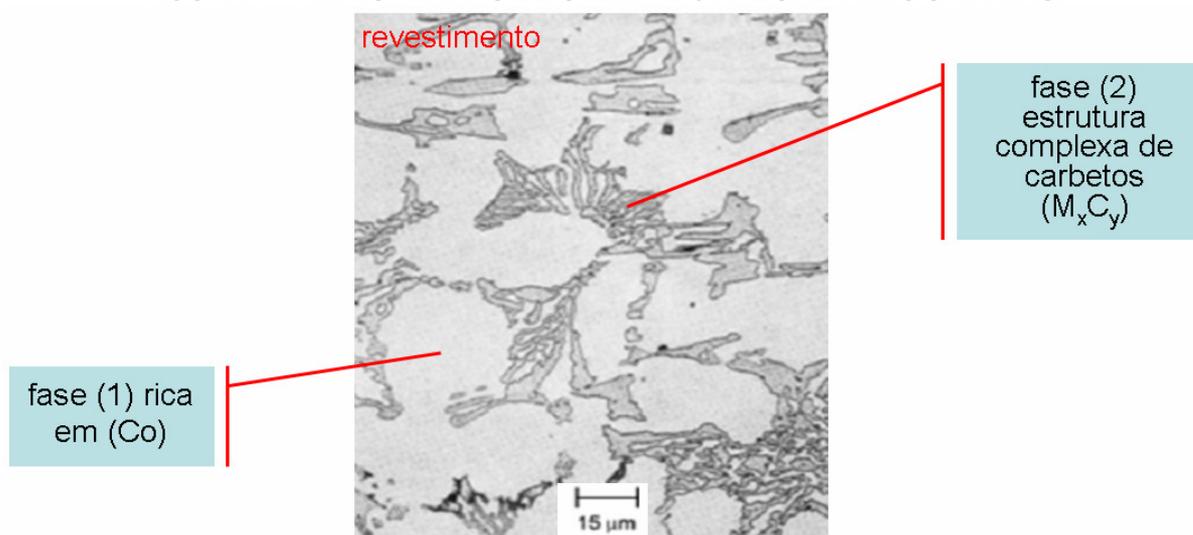
Na temperatura ambiente a estrutura cristalina do cobalto é hexagonal compacta (HC), porém a 422 °C o cobalto sofre transformação alotrópica, se tornando cúbica de face centrada (CFC). No entanto, a presença de tais elementos

como ferro, manganês, níquel e carbono tendem a estabilizar a estrutura (CFC), enquanto os elementos como cromo, molibdênio, tungstênio e silício estabilizam na alotropia (HC). (KLARSTROM; CROOK; WU, 2004).

2.1.2 Stellite 6

A Figura 1 apresenta típica microestrutura do revestimento de stellite 6 quanto aplicados em três camadas de revestimentos pelo processo de solda oxiacetileno. Nesta microestrutura observam-se duas fases, sendo a primeira rica em (Co) e a segunda é formada por uma estrutura complexa de carbeto (M_xC_y). Os carbeto caracterizam uma estrutura de partículas duras (KLARSTROM, CROOK, WU, 2004).

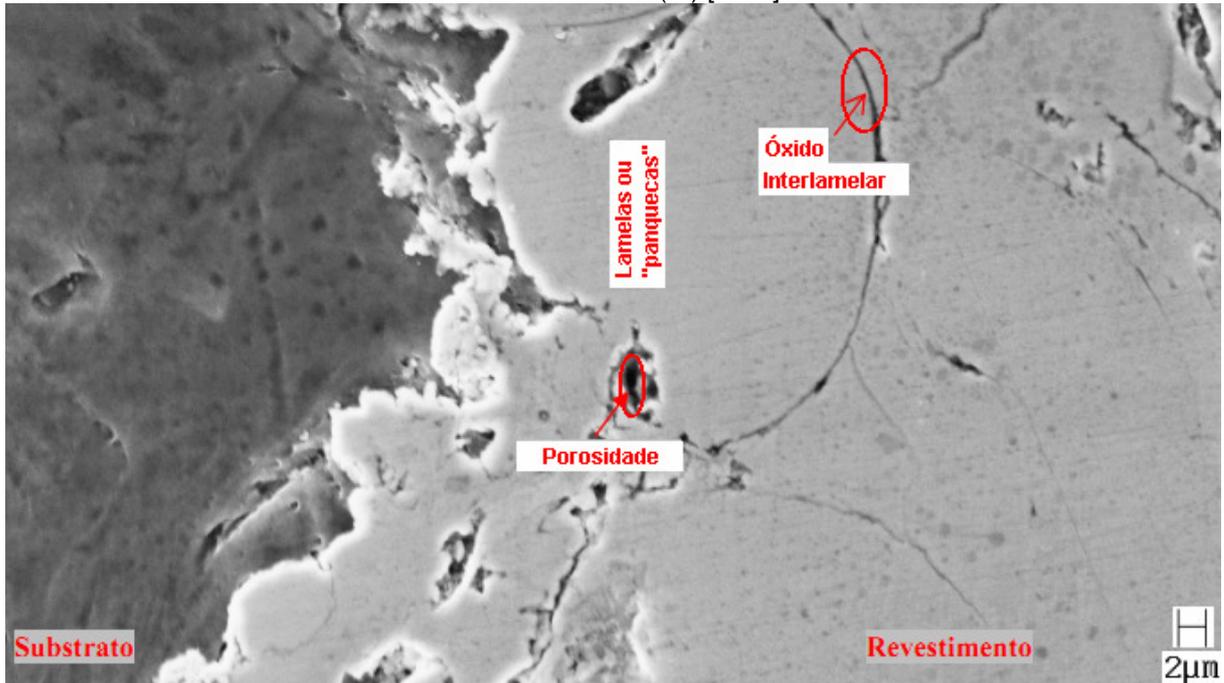
FIGURA 1 – REVESTIMENTO DE STELLITE 6 APLICADA EM 3 CAMADAS.



FONTE: Adaptado de Klarstrom, Crook e WU (2004).

Na Figura 2, observa-se uma morfologia do revestimento da deposição da liga de cobalto (1256) em substrato de alumínio 7475-T6 pelo processo a chama de alta velocidade - HVOF. Neste experimento, Lira (2012), denota por meio de micrografia eletrônica de varredura (MEV) uma morfologia de revestimento baseada em estrutura lamelar, formada por panquecas, poros, estrutura complexa de óxidos (interlamelar).

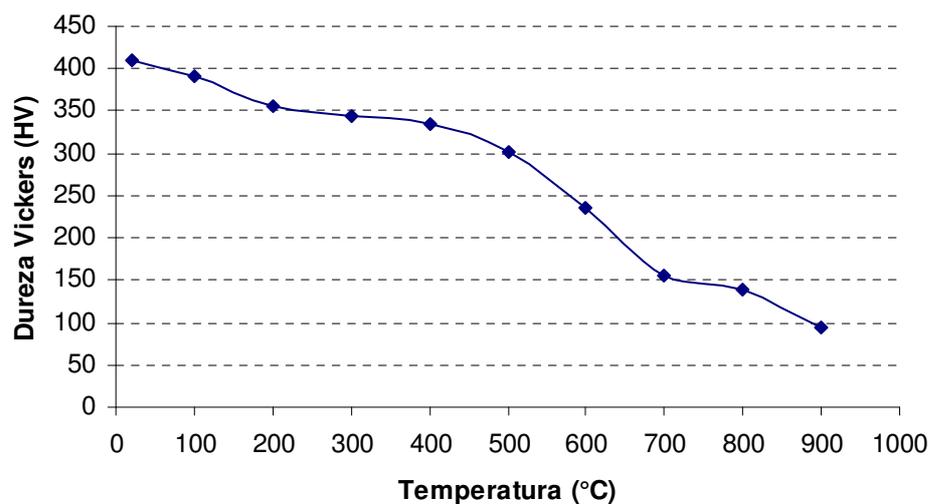
FIGURA 2 – MICROESTRUTURA DO REVESTIMENTO DA LIGA DE COBALTO (1256) APLICADO EM SUBSTRATO (Al) [MEV].



FONTE: Adaptado de Lira (2012).

No Gráfico 1 é possível verificar a influência da temperatura em relação à dureza. Neste sentido, com o aumento da temperatura a dureza diminui gradativamente, de forma a deixar a superfície do revestimento stellite 6 com uma dureza três vezes menor quando submetido à temperatura de 900 °C.

GRÁFICO 1 – INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA X DUREZA NO STELLITE 6

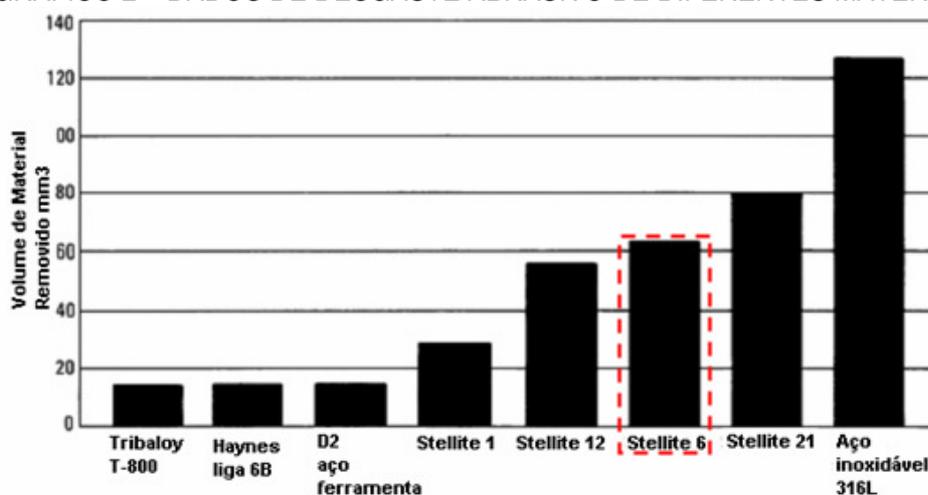


FONTE: Adaptado de Deloro (2008).

Segundo Crook (1992), a liga stellite 6 apresenta um comportamento intermediário no que se refere ao desgaste abrasivo e quando comparada a ligas de

revestimentos, de aço ferramenta, de alta dureza, conforme ilustra o Gráfico 2. Os dados levantados (Gráfico 2) estão de acordo com a norma *AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) G65* (ensaio de desgaste por roda de borracha). O desempenho na resistência ao desgaste abrasivo das ligas de cobalto (stellite 1, 6, 6B, 12, 21 e T-800) é em função do teor de W e C adicionado nas composições das ligas.

GRÁFICO 2 – DADOS DE DESGASTE ABRASIVO DE DIFERENTES MATERIAIS.



FONTE: Adaptado de Crook (1992).

Na Tabela 1 são apresentadas às propriedades físicas e também as mecânicas como a resistência à tração, escoamento, módulo de elasticidade e dureza da liga stellite 6.

TABELA 1 – PROPRIEDADES DA LIGA STELLITE 6.

Propriedades	Stellite 6
Densidade (g/cm ³)	4,8
Microdureza Vickers (HV)	390-490
Resistência à tração (MPa)	850
Resistência ao escoamento (MPa)	700
Módulo de elasticidade (GPa)	209
Condutividade térmica (W/mK)	14,82
Coefficiente de expansão térmica (µm/mK) a 100 ° C	11,35
Temperatura de fusão (° C)	1285-1410

FONTE: Adaptado de Deloro (2008).

2.2 LIGA DE ALUMÍNIO 6351-T6

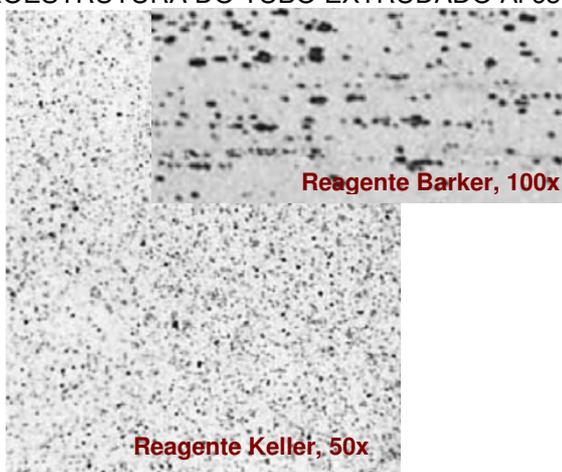
As ligas de alumínio são aplicadas largamente devido alta resistência mecânica e boa proteção contra corrosão e ultimamente por sua baixa densidade. No entanto, o alumínio 6351 é muito comercializado por possuir superior resistência à oxidação e baixa densidade, quando comparado à totalidade das ligas na série 6000. (KUMAR, *et al.*, 2016).

2.2.1 Propriedades físicas, químicas e mecânicas

As ligas de alumínio da série 6000 têm grande aplicabilidade na construção de aviões, navios, automóveis, pontes, tubulações e transporte, devido as seguintes propriedades mecânicas: ótima extrudabilidade, boa rigidez em componentes estruturais, são ligas tratáveis termicamente, resistentes à corrosão. (KUMAR, *et al.*, 2016; KUTZ, 2002; KAUFMAN, 2000).

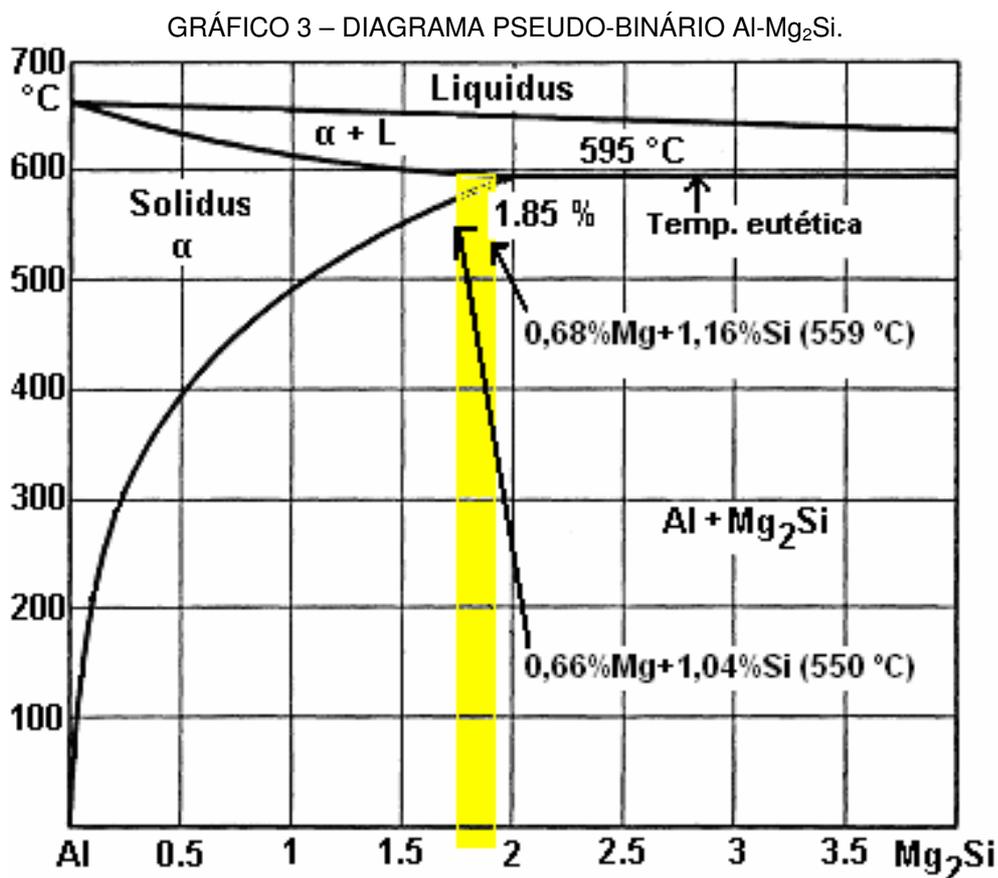
O alumínio 6351 é basicamente composto por: alumínio (Al) matriz principal, magnésio (Mg) e silício (Si). A microestrutura do Alumínio 6351 é formada por precipitados de Mg_2Si (pontos pretos Figura 3) e outros intermetálicos, com o objetivo de elevar a resistência mecânica da liga por tratamento térmico. (PRASAD; RAO, 2015; KAUFMAN, 2000). Segundo Warmuzek (2004), a adição de magnésio na composição do alumínio torna a liga tratável termicamente, por meio da precipitação da fase Mg_2Si no decorrer do processo de envelhecimento (tratamento térmico).

FIGURA 3 – MICROESTRUTURA DO TUBO EXTRUDADO Al 6351-T6.



FONTE: Adaptado de Kaufman (2000).

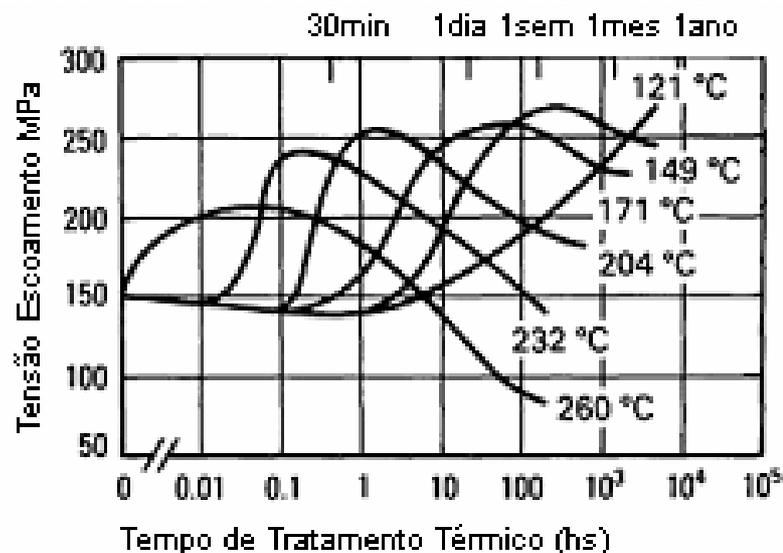
No diagrama pseudo-binário Al-Mg₂Si (Gráfico 3) são representadas as curvas de projeções *solidus* e *liquidus*, dessa forma percebe-se o limite de solubilidade do Mg₂Si no Al, sendo 1,85 % à temperatura eutética (595 °C). A fase de precipitação Mg₂Si apresenta normalmente um limite de solubilidade próximo dos 0,70 % Mg. (WARMUZEK, 2004; MONDOLFO, 1976; MONDOLFO, 1943).



FONTE: adaptado de Mondolfo (1943) e Warmuzek (2004).

O tratamento térmico das ligas na série 6000 é caracterizado pela letra T6 que indica solubilização e endurecimento por envelhecimento artificial. No Gráfico 4 é apresentado um grupo de curvas que mostra as mudanças no limite de escoamento que se somam com o aumento de tempo em cada uma das séries de temperaturas (BRAY, 1992).

GRÁFICO 4 – CURVAS DE TRATAMENTO TÉRMICO AL6061.

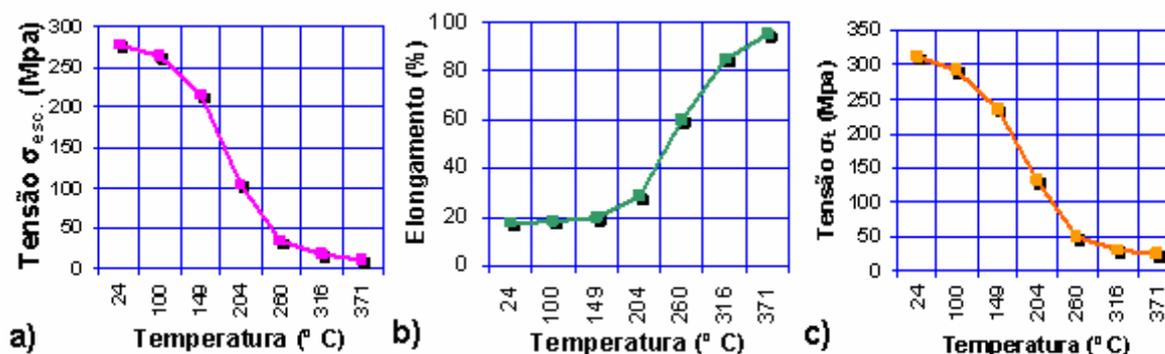


FONTE: Adaptado de Bray (1992).

As ligas de alumínio apresentam uma variação de tempo maior para alcançar a temperatura de fusão do que o aço, devido a sua maior condutividade térmica, no entanto, não devem ser aplicados em requisitos que solicitem resistência estrutural acima de 260 °C. (KUTZ, 2002).

Para tanto, Ibrahim, Lam e Ischenko (1997), observaram no aumento de temperatura, grande queda nos valores de tensão a partir de 130 °C, referente à resistência à tração e escoamento (Gráfico 5).

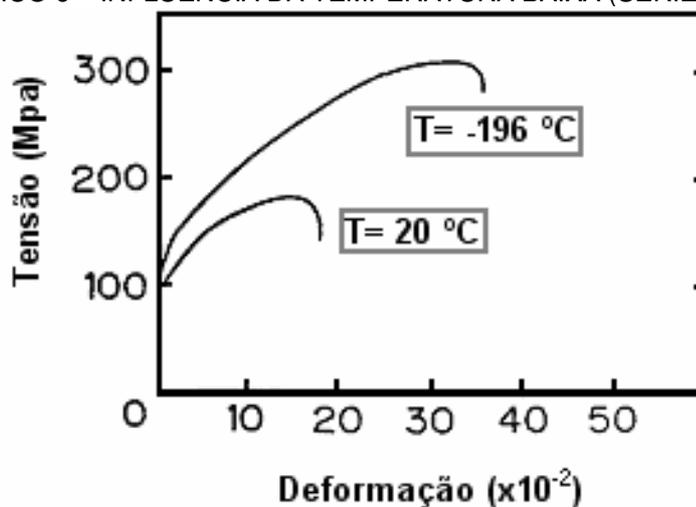
GRÁFICO 5 – EM (A) TENSÃO DE ESCOAMENTO X TEMPERATURA; (B) ELONGAMENTO X TEMPERATURA; (C) TENSÃO À RESISTÊNCIA DE TRAÇÃO X TEMPERATURA.



FONTE: Adaptado de Ibrahim, Lam e Ischenko (1997).

As ligas na série 6000 podem ser aplicadas em temperatura criogênica (Gráfico 6), porém suas resistências à tração e escoamento aumentam significativamente quando comparado ao seu parâmetro de temperatura ambiente. (KAGA, *et al.*, 1988).

GRÁFICO 6 – INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA BAIXA (SÉRIE-6000)



FONTE: Adaptado de Kaga *et al.* (1988).

A Tabela 2 apresenta às propriedades físicas no que tange as temperaturas de tratamento térmico e também as propriedades mecânicas quanto à resistência a tração, escoamento e dureza das ligas Al 6351-T6 e 6061-T6.

TABELA 2 – PROPRIEDADES DAS LIGAS AL 6351-T6 E 6061-T6.

Propriedades	6351-T6	6061-T6
Densidade (g/cm ³)	2,71	2,7
Dureza Brinnell (HB)	95	95
Resistência à tração (MPa)	310	310
Resistência ao escoamento (MPa)	283	276
Módulo de elasticidade (GPa)	69	69
Módulo de cisalhamento (MPa)	200	207
Condutividade térmica (W/mK)	176	167
Coefficiente de expansão térmica (µm/mK)	23,4	23,6
Solidus (° C)	555	582
Liquidus (° C)	650	652
Temperatura Solubilização (° C)	505	530
Temperatura de Envelhecimento (° C)	170	175

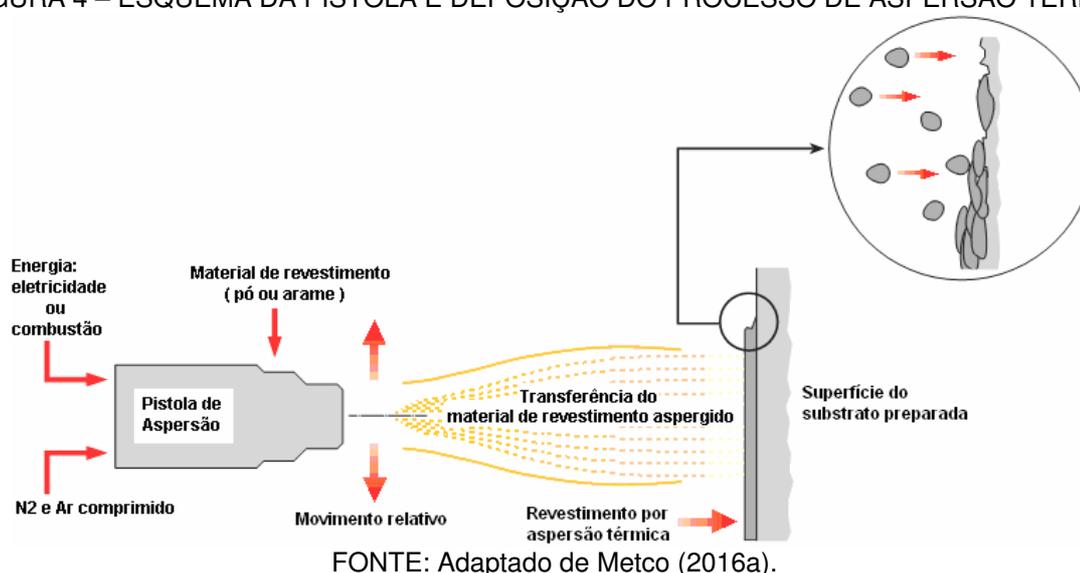
FONTE: Adaptado de Bray (1992).

2.3 ASPERSÃO TÉRMICA

Segundo Casteletti *et al.* (2010), nas formas existentes de revestimentos de materiais, a tecnologia de aspersão térmica é composta de vários processos que se destacam pela sua versatilidade em realizar deposição de ligas em superfícies de elementos que se deseja obter elevadas taxas de dureza para proteção ou até mesmo para reparo de peças.

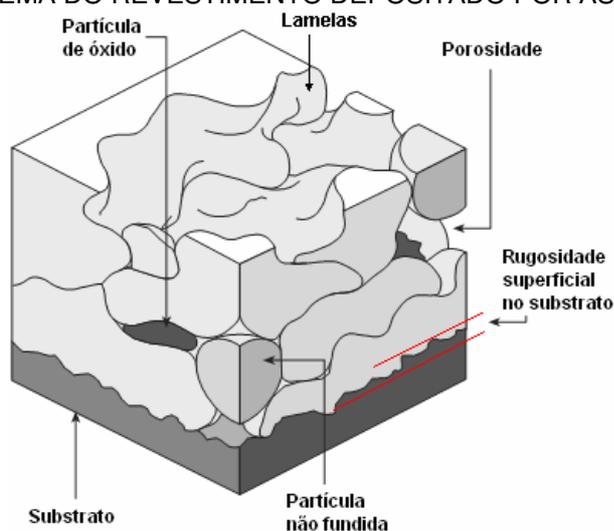
A Figura 4 apresenta o princípio de funcionamento de um sistema de aspersão térmica. As partículas de revestimentos após o aquecimento por gases ou arco elétrico, mudam para um estado plástico ou fundem e são transportadas até o substrato por um gás (ar comprimido ou nitrogênio), isto faz com que se desenvolva uma ligação mecânica entre material aspergido e a peça a ser recuperada ou protegida. Além disso, as partículas deformam-se e espalham-se como "panquecas" ou lamelas no substrato e à medida que as partículas resfriam, formam-se as camadas de revestimentos no substrato (PAWLOWSKI, 2008).

FIGURA 4 – ESQUEMA DA PISTOLA E DEPOSIÇÃO DO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA



Nestes processos, a adesão do revestimento ao substrato, principalmente, é definida pela rugosidade e qualidade da limpeza na superfície do material base. Por conta disso, o método de preparação de superfície nos materiais mais utilizado é por jateamento abrasivo, de forma a proporcionar uma boa rugosidade e um grau de limpeza dentro dos padrões normalizados. Isto de fato melhora o processo de ancoragem mecânica no substrato, aumentando a área de superfície para a ligação mecânica das partículas aspergidas. A Figura 5 apresenta a microestrutura de um revestimento por aspersão térmica contendo: lamelas, vazios, poros e filmes de óxidos, que participam da aderência das partículas aspergidas no substrato (PAWLOWSKI, 2008; SUCHARSKI, 2016; AWS, 1985).

FIGURA 5 – ESQUEMA DO REVESTIMENTO DEPOSITADO POR ASPERSÃO TÉRMICA



FONTE: Adaptado de Metco (2016a).

Ao observar a microestrutura esquemática na Figura 5, percebe-se que a adesão do revestimento ao substrato pode ser determinada pela preparação do substrato e pela coesão entre lamelas e filmes de óxidos, bem com a formação dos vazios e poros. Além disso, no substrato e revestimento podem atingir partículas que solidificam ou que não chegaram a fundir, durante a passagem pela chama do processo de aspersão térmica. Outro fator importante é o pré-aquecimento do substrato, que quando utilizado melhora significativamente a aderência do revestimento ao substrato.

2.3.1 Processos de Aspersão Térmica

A aspersão térmica pode ser realizada em aplicação de revestimentos baseados em polímeros, metais e cerâmicas sobre substrato com base metálica e não metálica. Dentre os processos de aspersão térmica que desempenham bons resultados nos revestimentos são: HVOF – *high velocity oxygen fuel* (oxicombustível de alta velocidade), *Arc-spray* (arco elétrico) e *Flame-spray* (chama convencional classificada: chama-pó e chama-aramé) (CASTELETTI, *et al.*, 2010).

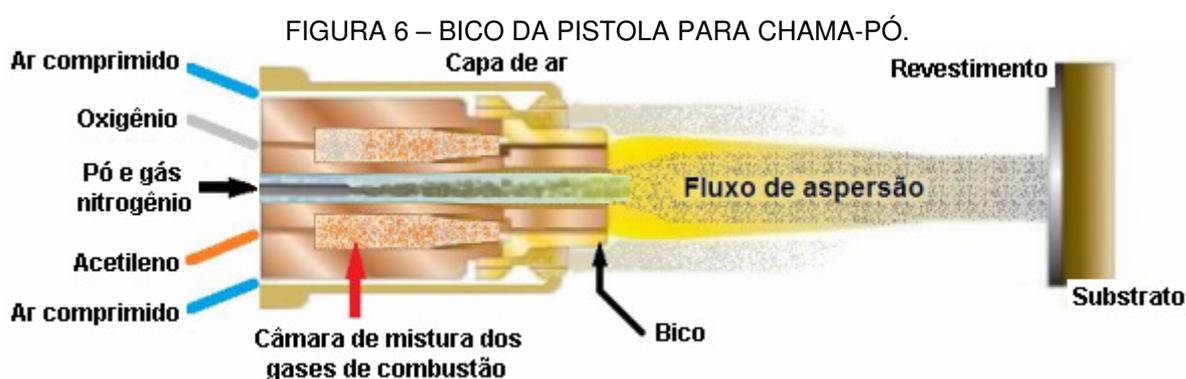
2.3.1.1 Chama convencional

A técnica chama convencional surgiu no início do século XX, sendo considerado o primeiro processo de aspersão térmica desenvolvida para deposição de metais, além de se estender mais tarde para revestimentos de ligas metálicas, materiais cerâmicos e polímeros. Os consumíveis (materiais de revestimento) podem ser fornecidos sob a forma de pó e o arame. (PAWLOWSKI, 2008).

2.3.1.2 Processo chama-pó

Este processo chama-pó utiliza o calor gerado pela combustão de mistura de gases para elevar a temperatura do material de deposição. A mistura dos gases combustíveis (oxigênio e acetileno) é mais utilizada pelo processo chama-pó pelo fato de gerar alta temperatura na chama. O processo de aspersão térmica chama-pó é caracterizado pelo transporte do pó aquecido por meio de gás nitrogênio. As camadas de revestimentos são formadas pelo ancoramento mecânico do material aspergido no substrato. (PAWLOWSKI, 2008).

O processo chama-pó (Figura 6) destaca-se por ser uma técnica de revestimento de fácil manuseio e baixo custo do equipamento, portanto continua até hoje em uso para deposição de materiais.

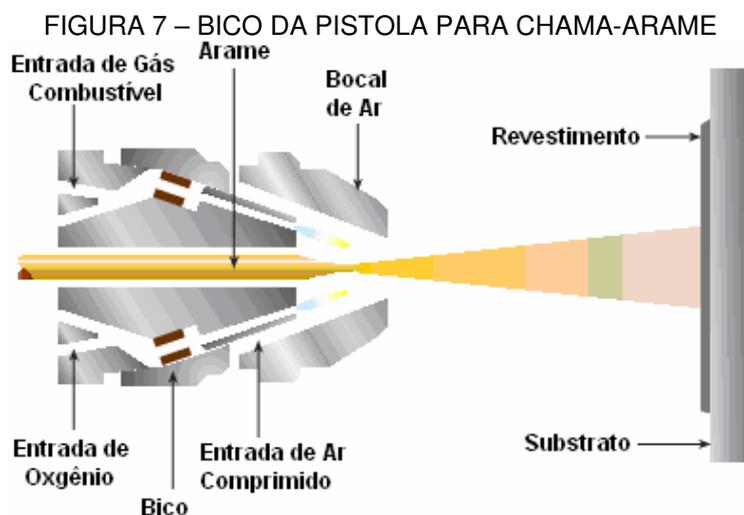


FONTE: Adaptado de Metco (2016a).

2.3.1.3 Chama-Arame

O processo chama-arame utiliza também gás combustível e oxigênio, no entanto, o que modifica neste processo é o consumível (arame ou vareta) e a pistola

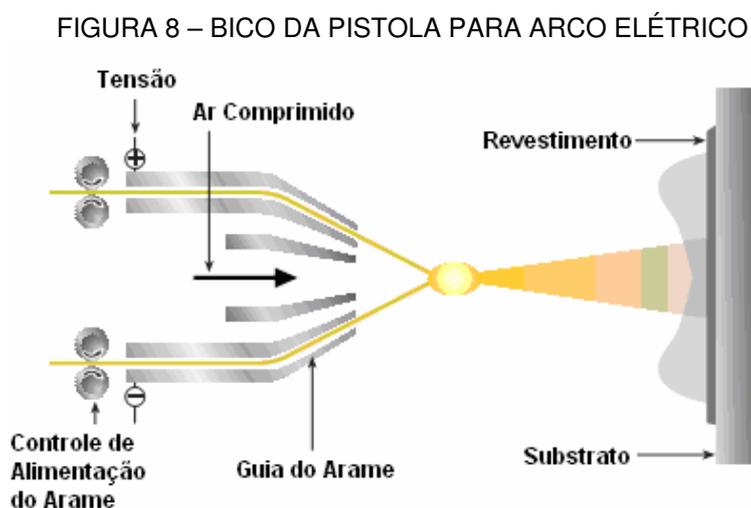
de aspersão (Figura 7). Neste processo a chama funde o arame ou vareta, por conseguinte, é atomizado pelo jato de ar comprimido, de forma a aspergir um fluxo de partículas que são propelidas no substrato (PAWLOWSKI, 2008).



FONTE: Adaptado de Metco (2016a).

2.3.1.4 Arco elétrico

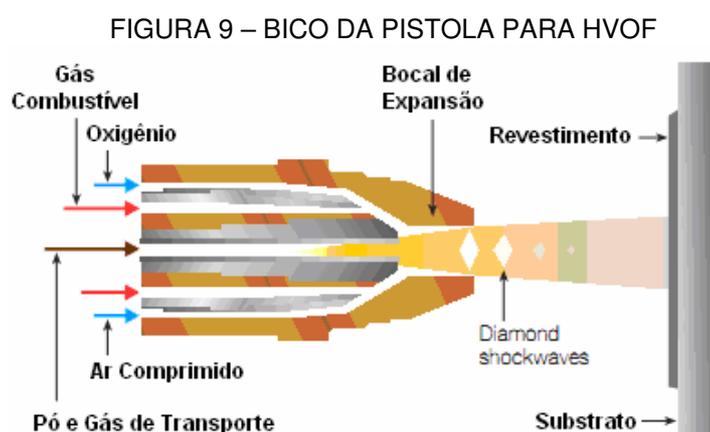
Neste sistema o arco elétrico (Figura 8) é formado pelo contato e curto circuito de dois arames metálicos que conduzem à fusão do consumível. Em seguida, o ar comprimido atomiza o metal fundido, de forma a aspergir em alta velocidade contra o substrato (PAWLOWSKI, 2008).



FONTE: Adaptado de Metco (2016a).

2.3.1.5 Oxicombustível de alta velocidade (HVOF)

Este processo é muito similar ao processo chama-pó, entretanto, o que muda é a alta velocidade do impacto das partículas no substrato (Figura 9). O HVOF proporciona um revestimento com baixa porosidade e melhora a aderência das camadas aspergidas no substrato, quando comparado a outros processos clássicos de aspersão térmica por gases oxicombustível (PAWLOWSKI, 2008).



2.3.2 Preparação do substrato por jateamento superficial

O jateamento caracteriza-se pela remoção de carepas e impurezas, em superfícies de substratos com oxidações, isto de fato o torna um método eficaz principalmente quando se utiliza abrasivos como: gralha de aço, microesfera de vidro, escória de cobre e óxido de alumínio (SILVA, 2013).

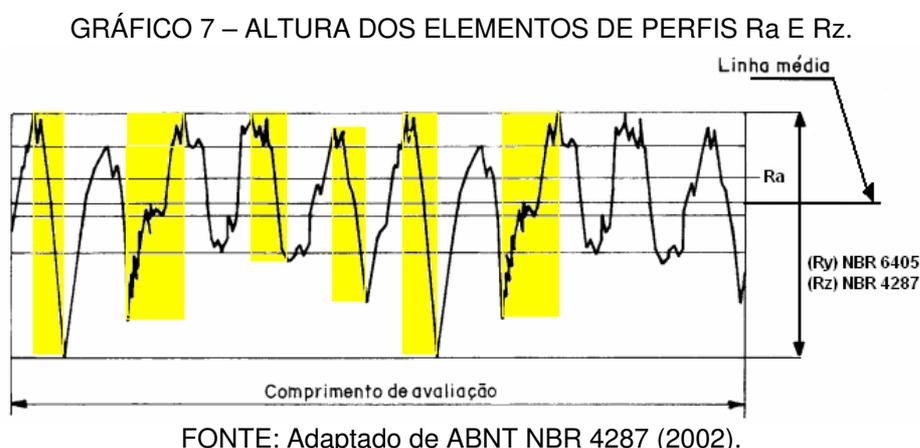
Além do tipo de abrasivo, outros fatores importantes incluem o tamanho das partículas, forma das partículas, ângulo de jateamento, pressão e pureza do particulado abrasivo (PAWLOWSKI, 2008).

Contudo o efeito do jateamento é verificado pelo impacto de partículas abrasivas aceleradas em alta velocidade até a superfície do substrato, produzindo lascamento do material do substrato e determinando assim rugosidade da área tratada do material. Desta forma, são classificadas duas características importantes neste processo de preparação de superfície: a remoção de impurezas que possam impedir a ligação do revestimento ao material e criar um índice de rugosidade

adequado para permitir uma ótima ancoragem mecânica entre a camada de proteção e material a ser beneficiado (SILVA, 2013).

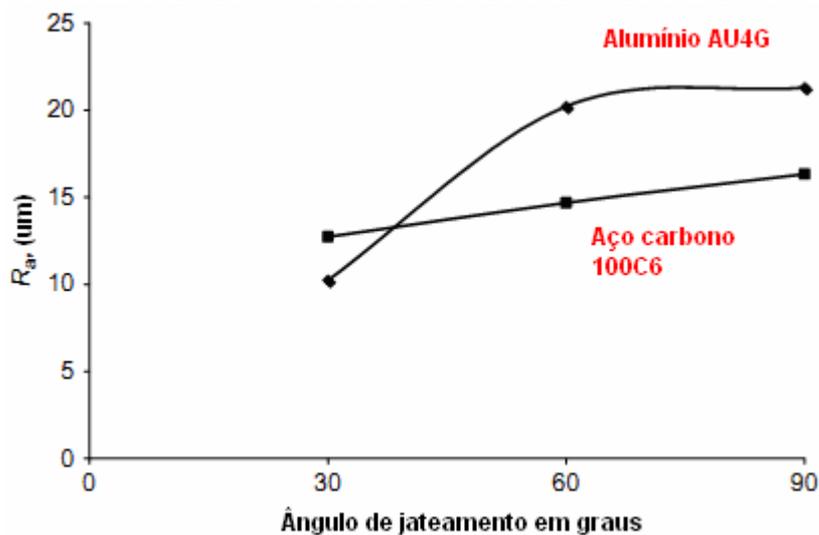
2.3.3 Rugosidade superficial

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 4287 (2002), preconiza alguns parâmetros importantes para determinação da rugosidade superficial no substrato. O parâmetro R_y (norma antiga) ou R_z determina a altura máxima do perfil da rugosidade e por fim o R_a é determinado do desvio aritmético médio do perfil de rugosidade, conforme nota-se no Gráfico 7.



Segundo Paredes e D'Oliveira (2001), a variação na rugosidade R_y de 80 para 50 μm , obteve pouca influência na tensão de aderência ± 10 MPa quando realizado a deposição de pó de alumínio com granulometria $-90+45$ μm em substrato de aço carbono 1020 sem pré-aquecimento, pelo processo chama-pó.

Entretanto, no experimento realizado por Mellali *et al.* (1997), ao variar o ângulo de jateamento de 30 para 90 graus em tratamento de superfície de alumínio, confirmou-se no valor inicial de 30 graus o $R_a = 10$ μm e a partir de 60 graus o R_a se estabilizou em 20 μm . Além disso, o tamanho do particulado de alumina utilizado foi de 1,4 mm e a pistola de jateamento estava a 100 mm de distância em relação ao substrato. No Gráfico 8 é possível verificar este efeito.

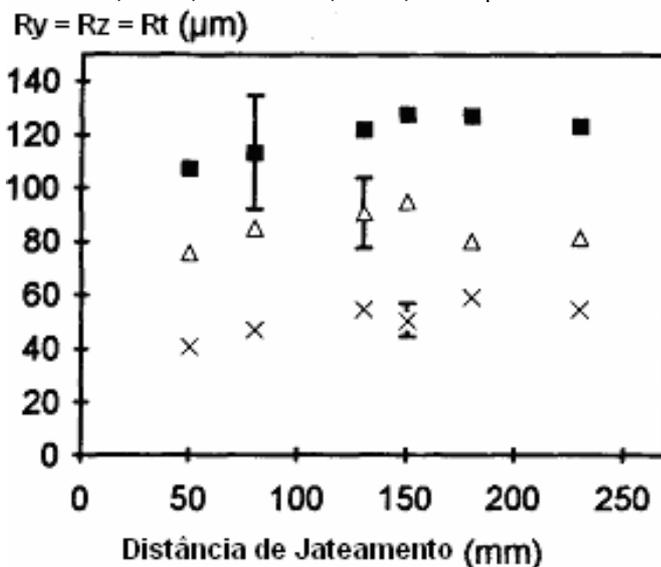
GRÁFICO 8 – INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE JATEAMENTO VERSUS (R_a).

FONTE: Adaptado de Mellali *et al.* (1997).

Ainda, Mellali *et al.* (1997), observaram no substrato de alumínio (AU4G) para um jateamento há 100 mm de distância, os seguintes resultados: $R_y = 40 \mu\text{m}$ para diâmetro do abrasivo de 0,5 mm (35 mesh), $R_y = 80 \mu\text{m}$ para diâmetro do abrasivo de 1 mm (18 mesh) e $R_y = 100 \mu\text{m}$ para diâmetro do abrasivo de 1,4 mm (14 mesh). No entanto, percebeu-se que o abrasivo com maior diâmetro (1,4 mm) apresentou o índice de 7% de resíduos no substrato, após o procedimento de limpeza via ultrassom e cálculo de percentual de impurezas na superfície do material por imagem (Gráfico 9).

GRÁFICO 9 – INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA DE JATEAMENTO VERSUS (R_y).

■ = 1,4 mm, ▲ = 1 mm, x = 0,5 mm para AU4G.



FONTE: Adaptado de Mellali *et al.* (1997).

Outro ponto, estes resultados foram alcançados com a utilização de partículas abrasivas de alumina. Os autores Mellali *et al.* (1997), também observaram que na faixa de 3 a 6 segundos para aplicar o jateamento, foi adequado para obter um elevado nível de rugosidade nos substratos de alumínio, ferro fundido e aço.

2.3.4 Tensão de aderência

A aderência é definida como a resistência mecânica de um revestimento aplicado por aspensão térmica compreendendo a adesão entre o material depositado e o substrato. A aderência também pode ser caracterizada como a coesão entre as partículas depositadas no substrato (PETROBRAS, 2011).

No estudo de aderência realizado com liga de cobalto (T800) depositado por aspensão térmica em superfície de titânio, com o intuito de analisar a relação do ângulo de jateamento, percebe-se que a tensão máxima de adesão ficou próximo dos 90 graus em concordância com o maior índice de rugosidade na superfície do substrato (BAHBOU; NYLEN; WIGREN, 2004).

Uma característica que afeta diretamente a tensão de aderência é o pré-aquecimento no substrato, por conta disso, Paredes e D'Oliveira (2001), aqueceram o aço carbono 1020 em 120 °C, todavia percebeu-se que melhorou o efeito de molhabilidade, por conseguinte, facilitou a formação de panquecas homogêneas aspergidas por chama-pó na superfície da peça. Além disso, a aplicação do pré-aquecimento minimizou a formação de porosidade e obteve um valor de tensão de aderência na ordem de 24 MPa para a faixa de rugosidade R_y entre 50 e 60 μm e 17 MPa de tensão de aderência dentro do índice de rugosidade R_y entre 70 e 80 μm no substrato.

2.3.5 Porosidade

A presença de porosidade pode afetar as propriedades físicas (condutividade elétrica e térmica) do revestimento aspergido termicamente, além de reduzir a coesão e a ancoragem das camadas ao substrato (PETROBRAS, 2011).

Segundo Sucharski (2016), Silva e Paredes (2016) o pré-aquecimento do substrato melhora o mecanismo de molhabilidade, pela diminuição da taxa de transferência de calor para o material base (substrato), dessa forma, minimiza a formação de porosidade nos revestimentos.

Durante o processo de aspersão algumas partículas podem ser não fundidas ou superaquecidas em seu trajeto de formação de camadas (panquecas) e isto de fato influencia na geração de vazios nos revestimentos, conhecido como porosidade. A porosidade está presente em processos de aspersão térmica, normalmente por causa das aberturas de ar do meio ambiente que envolve a zona de transferência das partículas aspergidas e camadas já ancoradas ao substrato que ficam expostas ao oxigênio do ar após os deslocamentos da pistola. A quantidade apresentada de porosidade nos revestimentos depende de diversos fatores como: temperatura, velocidade da partícula, tamanho da granulometria do pó e dos parâmetros de aspersão (RODRIGUEZ, 2003; SIMUNOVIC, 2010; SUCHARSKI, 2016).

2.3.6 Óxidos

Além da porosidade, a inclusão de óxidos está presente nos processos de aspersão térmica. A formação de óxidos consiste na exposição das partículas superaquecidas ou fundidas, durante o transporte do material de revestimento até o substrato. Os principais fatores podem ser classificados como o gás de transporte, o ar do meio ambiente que faz parte da atmosfera de transferência e as panquecas ou camadas já ligadas mecanicamente ao substrato também expostas ao ar do meio após o transporte desde a pistola (SILVA, PAREDES, 2016; RODRIGUEZ, 2003).

2.4 DESGASTE

O desgaste promove a deterioração de componentes que interagem em equipamentos utilizados na indústria, pelo efeito da perda de material na superfície em movimento dos corpos. Além disso, o desgaste pode ser caracterizado como na presença ou na ausência de lubrificantes eficazes, definido como o desgaste lubrificado ou não lubrificado. De outra forma o desgaste pode ser classificado como

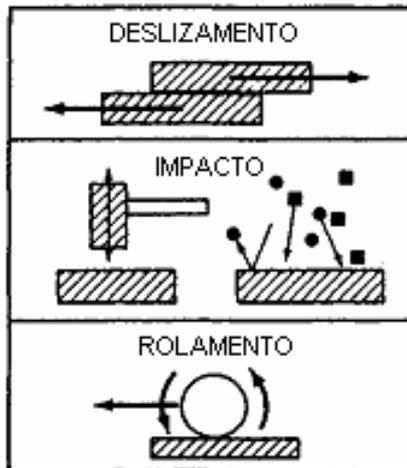
sendo a remoção indesejável de material de superfícies em contato por ação mecânica. (DAVIS, 2001).

De acordo com Correa (2005), desgaste é definido como a perda progressiva de material na superfície de um corpo, proveniente do movimento relativo dessa superfície sendo adjacente a uma ou várias outras substâncias em contato, de origem por ação mecânica, ou seja, por contato e movimento relativo de um contra corpo sólido, líquido ou gasoso.

Segundo Eyre (1978), classificou os diversos tipos de desgastes em ambientes industriais da seguinte forma: abrasivo (50 %), adesivo (15 %), erosivo (8%), por oscilação (8 %) e corrosivo (5 %). Todavia, o desgaste nem sempre é o resultado de somente um mecanismo atuante. Ainda, podem existir eventos em que um tipo muda para outro ou mais mecanismos operam em conjunto.

Os mecanismos de desgastes podem ser classificados de acordo com o tipo de movimento relativo encontrado (Figura 10), ou seja, em três categorias: deslizamento, impacto e contato de rolamento (DAVIS, 2001).

FIGURA 10 – TIPOS DE MECANISMOS DE DESGASTES.



FONTE: Davis (2001).

2.4.1 Mecanismo de desgaste por deslizamento

Segundo Davis (2001), o desgaste por deslizamento pode ser classificado pelos principais mecanismos: abrasivo, adesivo e fadiga.

2.4.1.1 Desgaste abrasivo

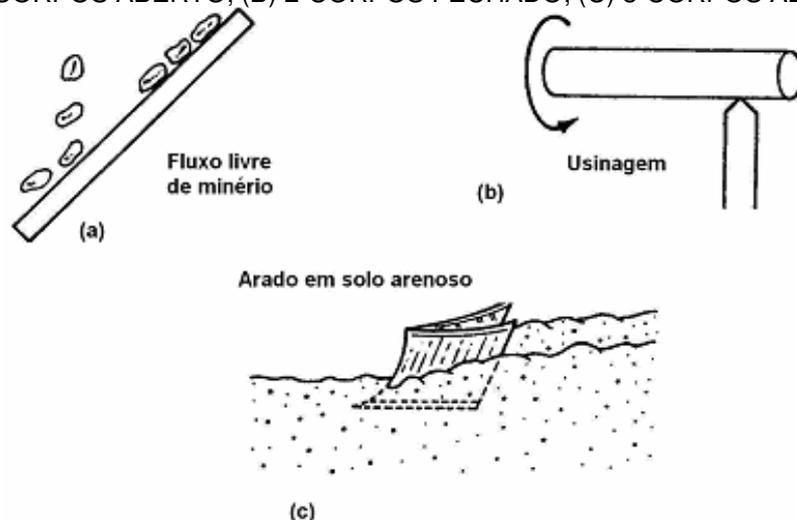
Segundo Davis (2001), desgaste abrasivo é definido pela interação entre partículas duras forçadas contra e movendo-se ao longo de uma superfície sólida. Basicamente, um material é fortemente raspado ou arranhado apenas por uma partícula mais dura.

Conforme Correa (2005), desgaste abrasivo pode ser contextualizado como o desgaste que ocorre quando as partículas duras podem ser as asperidades do contra-corpo, em relação à qual estão em movimento e, por conseguinte, remove material na forma de lascas alongadas. A superfície danificada do contra-corpo é descrito como ranhura, entalhe ou goivagem, dependendo de sua severidade.

O desgaste abrasivo é classificado de acordo com o tipo de contato, bem como o ambiente de contato. Dessa forma os tipos de contato são categorizados como 2-corpos e 3-corpos. A abrasão do tipo 2-corpos (desgaste por deslizamento) se caracteriza quando a partícula ou asperidade desliza sobre a superfície do material. No tipo 3-corpos (desgaste abrasivo por rolamento) as partículas estão soltas na interface e rolam causando indentações (DAVIS, 2001; SCHEID, 2007).

Segundo Davis (2001), o sistema de 2-corpos experimenta de 10 a 1000 vezes mais perda de material do que o tipo 3-corpos para uma dada carga e comprimento da trilha de desgaste e os ambientes de contato podem ser classificados em abertos e fechados conforme Figura 11.

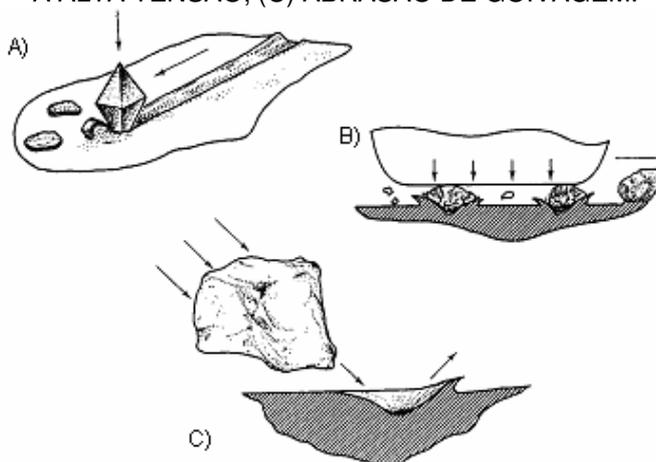
FIGURA 11 – TIPOS DE AMBIENTES DE CONTATO NO CICLO DE DESGASTE DOS SISTEMAS: (A) 2-CORPOS ABERTO; (B) 2-CORPOS FECHADO; (C) 3-CORPOS ABERTO.



FONTE: Davis (2001).

O desgaste abrasivo classifica-se também por: abrasão a baixa tensão, abrasão a alta tensão e abrasão de goivagem (impacto). Na abrasão a baixa tensão o dano é resultado da remoção de material por riscamento (Figura 12(a)), portanto os abrasivos angulares com arestas vivas produzem desgaste mais severo. A abrasão a alta tensão ocorre quando os materiais abrasivos, ao serem forçados a passar entre duas superfícies sob tensão, são retidos pelas mesmas (Figura 12(b)). O dano na superfície é devido à combinação de riscamento e deformação plástica. A abrasão por goivagem ocorre pela remoção de material na superfície de um componente, submetido ao impacto localizado (Figura 12(c)), pela ação cortante de partículas abrasivas. O corte causado pelo abrasivo produz ranhuras na superfície danificada. (DAVIS, 2001).

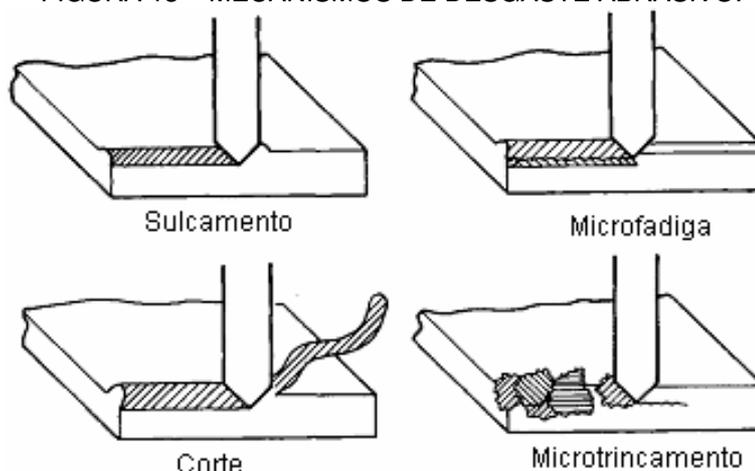
FIGURA 12 – (A) ABRASÃO A BAIXA TENSÃO; (B) ABRASÃO A ALTA TENSÃO; (C) ABRASÃO DE GOIVAGEM.



FONTE: Davis (2001).

Diversos mecanismos buscam em explicar como o material é removido de uma superfície de um componente durante a abrasão. Estes mecanismos incluem fratura, fadiga e fusão, todavia, devido a grande complexidade da abrasão, nenhum mecanismo explica completamente toda a perda. A Figura 13 ilustra alguns dos processos que são possíveis quando uma única ponta abrasiva danifica a superfície do componente. Estes mecanismos podem ser: sulcamento, microfadiga, corte e microtrincamento. (DAVIS, 2001).

FIGURA 13 – MECANISMOS DE DESGASTE ABRASIVO.



FONTE: Davis (2001).

2.4.1.2 Desgaste adesivo

O desgaste adesivo pode ocorrer quando as superfícies deslizam uma contra a outra. A alta pressão local entre as asperezas em contato resulta em deformação plástica, adesão e conseqüentemente a formação de junções localizadas. O deslizamento relativo entre as superfícies em contato causa ruptura destas junções e freqüentemente transfere material de uma superfície para outra. A formação de junção no local do contato entre as duas superfícies pode ser caracterizada como coesão, desta forma une as superfícies por meio de uma solda (ZUM GAHR, 1987).

2.4.1.3 Desgaste por fadiga

O desgaste devido à fadiga pode ser contextualizado pela propagação de trincas e na seqüência pela delaminação (lascamento) do material provocado pelo carregamento cíclico e repetitivo de superfícies sólidas. O deslizamento e o impacto de partículas sólidas ou líquidas podem formar tensões cíclicas superficiais, de forma a produzir a fadiga superficial (ZUM GAHR, 1987).

2.4.2 Desgaste por impacto

É conceituado como desgaste de uma superfície sólida devido à exposição de choque repetitivo pelo contato dinâmico por outro corpo. Entretanto, o desgaste por erosão é um tipo de desgaste por impacto. A remoção de material por impacto na superfície de partículas sólidas presentes em um determinado fluido é característico de desgaste por erosão. Ainda o mecanismo de desgaste por cavitação é uma forma de desgaste por impacto, onde qualquer líquido que apresente bolhas gasosas que manifestam núcleos de cavitação (ENGEL, 1992).

2.4.3 Desgaste por rolamento

É considerado um desgaste de uma superfície sólida decorrente do contato por rolamento entre outra superfície. Quando duas superfícies estão em contato por meio de rolamento puro, ou quando houver movimento por rolamento e deslizamento durante a operação (DAVIS, 2001).

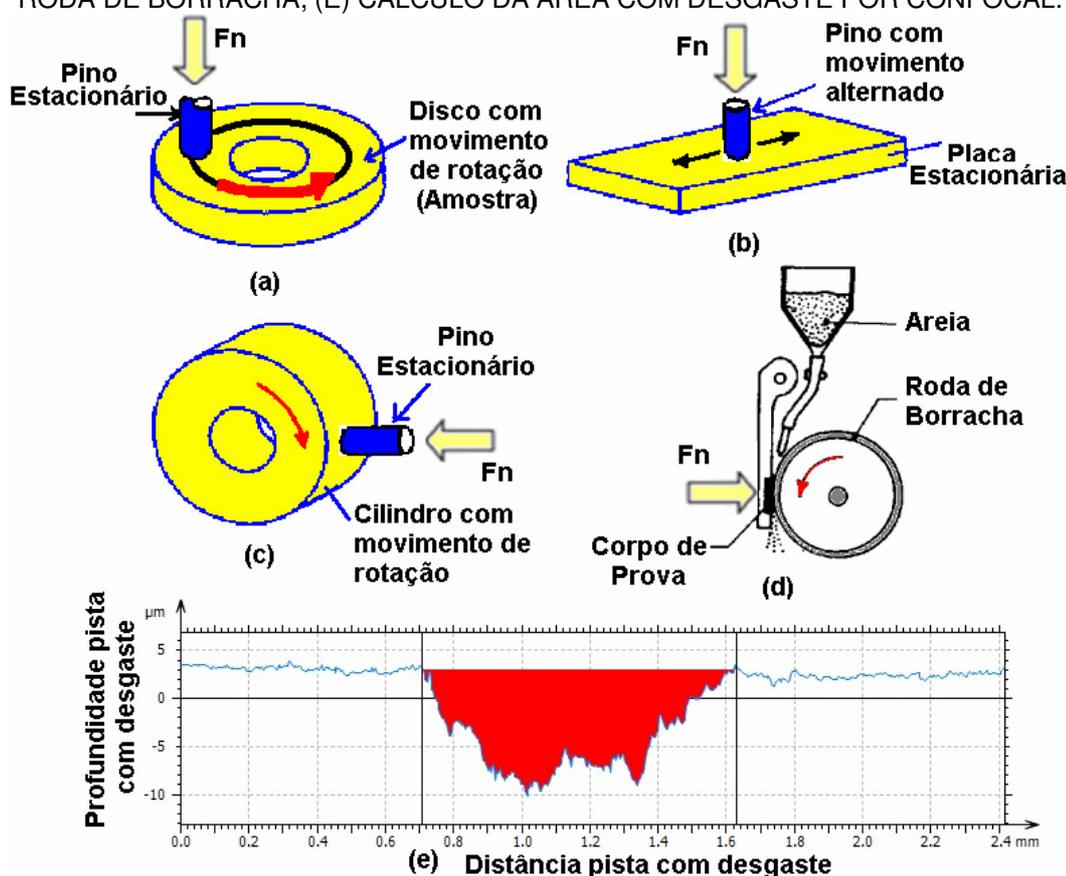
2.4.4 Métodos de ensaio de desgaste: por deslizamento e por abrasão

A ocorrência do desgaste por deslizamento manifesta-se pela interação entre asperidades, especialmente quando não se tem lubrificação entre as duas superfícies, ou ainda, quando a lubrificação é mínima, permitindo o contato entre as asperidades das duas superfícies. A avaliação do desempenho de materiais com relação ao deslizamento pode ser conduzida em laboratório por meio de ensaios que reproduzem diferentes tipos de contato, tais como pino-sobre-disco, pino-sobre-cilindro (Figuras 14(a)(c)), dentre outros (UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA (UFU), 2017). A Figura 14(a) apresenta um tribômetro pino-sobre-disco, geralmente utiliza pino estacionário, com ponta esférica fixa e disco (corpo de prova) com movimento de rotação, conforme norma ASTM G99 (2010). Segundo Bhushan (2013) e UFU (2017) os ensaios podem ainda ter sentido único de deslizamento (Figuras 14(a)(c)), ou com mudança de sentido: ensaio de deslizamento alternado (pino-sobre-placa - Figura 14(b)). Para quantificar o volume de material removido na amostra, pode-se utilizar o método de pesagem dos

experimentos antes e após o ensaio (SCHEID, 2007). A Figura 14(e) demonstra outro método para quantificar a região com desgaste na amostra, especialmente em casos onde a trilha de desgaste formada é muito pequena, assim utiliza-se o microscópio confocal para calcular a perda de massa no corpo de prova.

A Figura 14(d) denota um método de ensaio de desgaste por abrasão, caracterizado por um corpo de prova no formato tipo bloco, sendo pressionado com carga constante sobre uma roda de aço revestido por um cinto de borracha, tendo uma determinada rotação de giro. Neste processo são adicionados abrasivos para avaliar a taxa de desgaste. (BHUSHAN, 2013; HUTCHINGS, 1992).

FIGURA 14 – (A) PINO-SOBRE-DISCO; (B) PINO-SOBRE-PLACA; (C) PINO-SOBRE-CILINDRO; (D) RODA DE BORRACHA; (E) CÁLCULO DA ÁREA COM DESGASTE POR CONFOCAL.



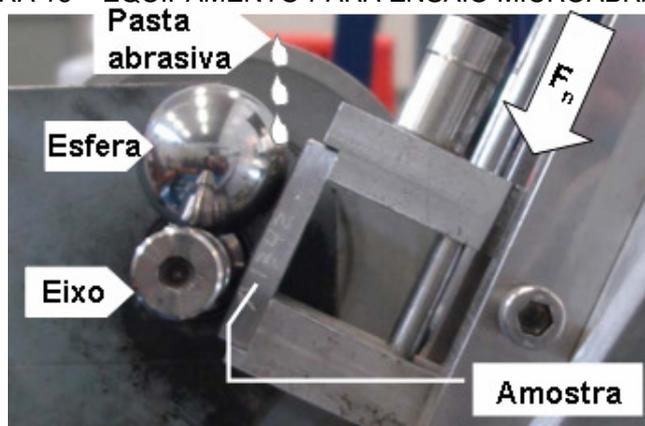
FONTE: Adaptado Bhushan (2013)

2.4.5 Avaliação da resistência ao desgaste em revestimento aspergido

Em um ensaio de desgaste, realizado por Macedo *et al.* (2006), foi depositado o stellite 6 em substrato de Al 7075-T3 pelo processo HVOF, obtendo-se 504 μm de espessura no revestimento, a qual foi submetido ao ensaio microabrasivo

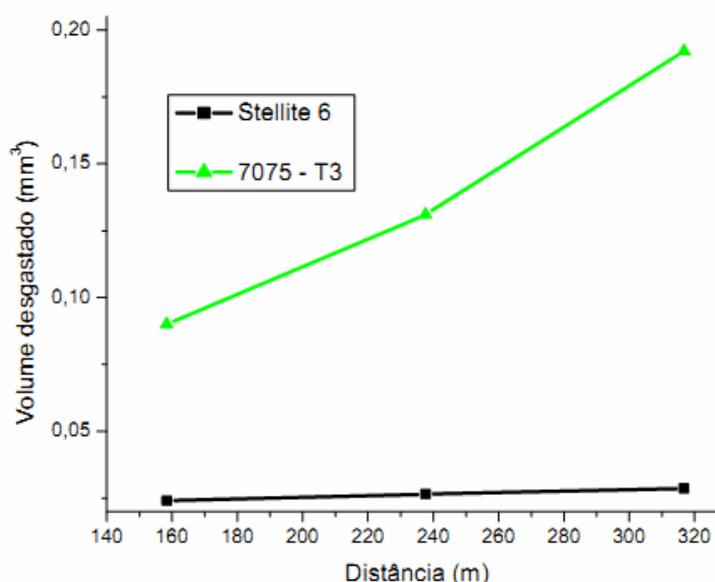
(esfera livre) para avaliar o desempenho frente ao volume de material removido. No método utilizado de acordo com a Figura 15, foram atribuídos os seguintes parâmetros: esfera de aço ligado ABNT 52100 temperado com diâmetro de 25,4 mm (girava contra a amostra), rotação da esfera de 150 rpm, velocidade tangencial de 0,22 m/s, distância percorrida até 316,8 m e pasta abrasiva gotejada entre a esfera e a amostra na proporção de 0,32 gramas de solução de alumina 5 μm para cada mililitro de água destilada. No Gráfico 10, percebe-se que o revestimento stellite 6 teve um desempenho 8 vezes melhor que o alumínio 7075-T3 em volume de material removido após um distância percorrida de 316,8 m, demonstrando a performance do revestimento no contexto de desgaste microabrasivo.

FIGURA 15 – EQUIPAMENTO PARA ENSAIO MICROABRASIVO.



FONTE: Adaptado Lira (2012)

GRÁFICO 10 – ENSAIO MICROABRASIVO



FONTE: Adaptado Macedo *et al.* (2006).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esse capítulo faz uma abordagem em materiais, equipamentos, metodologia experimental, técnicas de caracterização dos experimentos adotados para realização dos estudos sobre o efeito do comportamento entre a liga metálica de deposição e substrato, na microestrutura, nas propriedades de aderência, dureza e resistência ao desgaste por deslizamento dos revestimentos stellite 6 aspergidos por chama-pó sobre corpos de provas de Al 6351-T6.

3.1 MATERIAIS

Na Tabela 3 é especificado o percentual da composição química da liga de alumínio 6351, utilizado no projeto de pesquisa como substrato.

TABELA 3 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA LIGA DE ALUMÍNIO 6351 (% PESO).

Liga ABNT	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
6351	Bal.	0,7-1,3	0,5	0,1	0,4-0,8	0,4-0,8	0,2	0,2

FONTE: ABNT NBR 6834 (2000).

Como material de revestimento foi selecionada a liga de cobalto, cuja nomenclatura é stellite 6, tendo como características principais: alta dureza e boa resistência ao desgaste e a corrosão. Foi adquirido o pó stellite SF6 do fabricante Deloro, sua referência comercial SCD-KX, com granulometria $-106+20 \mu\text{m}$. Na Tabela 4 é apresentado a composição da liga stellite SF6 utilizada na deposição das camadas revestidas no substrato. No Anexo A é detalhado a certificação da liga stellite SF6, bem como a análise química, física, peneiramento do pó e normalização de fabricação.

TABELA 4 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA LIGA STELLITE 6 (% PESO).

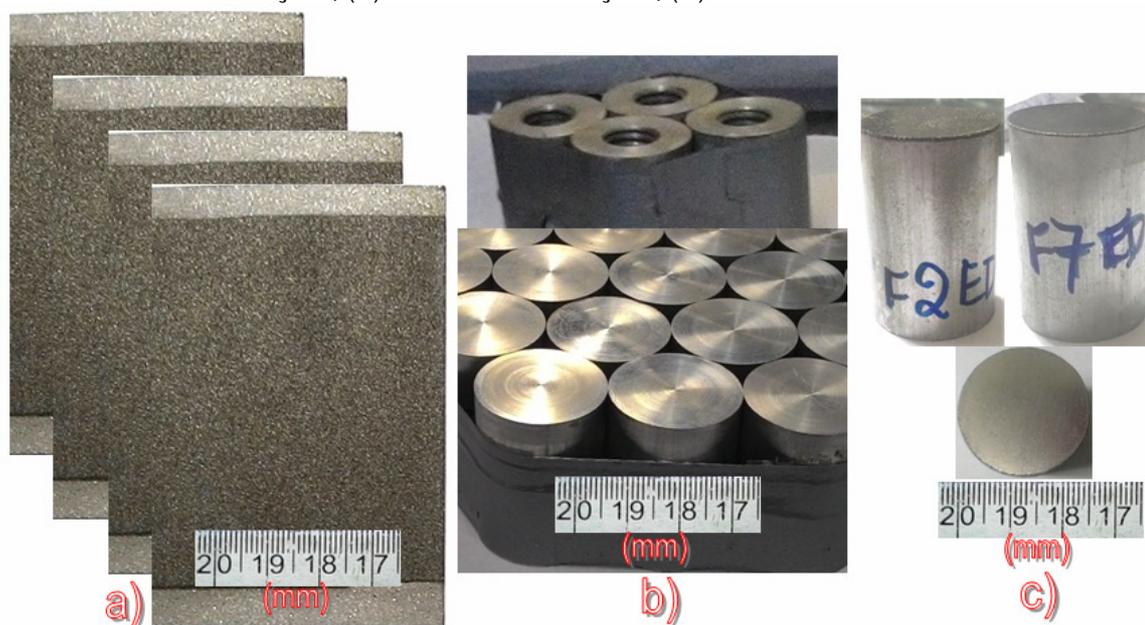
Liga Cobalto	Co	Cr	Ni	W	Si	Fe	B	C
Stellite 6	Bal.	19	14	7,5	2,6	3	1,7	0,8

FONTE: Deloro (2008).

3.2 CONFIGURAÇÃO DAS AMOSTRAS

Foram confeccionados três tipos de corpos de prova de acordo com as necessidades de cada ensaio realizado. Para a caracterização e ensaio de aderência por dobramento, as amostras foram produzidas a partir de perfil retangular extrudado de alumínio 6351-T6 de 50,8 x 12,7 mm com espessura de 1,3 mm, assim os corpos de prova foram cortados em placas 50 x 75 mm. Segundo o fabricante Alumassa a tolerância da espessura é $(1,3 \pm 0,18)$ mm devido o processo de extrusão. Para os ensaios de resistência ao desgaste e aderência por tração, as amostras foram produzidas a partir de barras de alumínio 6351-T6 de diâmetro 25,4 mm, adquiridas do fornecedor Metaltron e seccionadas em cilindros com 35 mm de profundidade. No ensaio de aderência por tração foram usinadas roscas conforme norma ASTM C633 (2008). A Figura 16 mostra um exemplo de cada tipo de amostra após as usinagens finais.

FIGURA 16 – TIPOS DE AMOSTRAS PARA: (A) ENSAIO DE DOBRAMENTO E CARACTERIZAÇÃO; (B) ENSAIO DE TRAÇÃO; (C) ENSAIO PINO-SOBRE-DISCO.



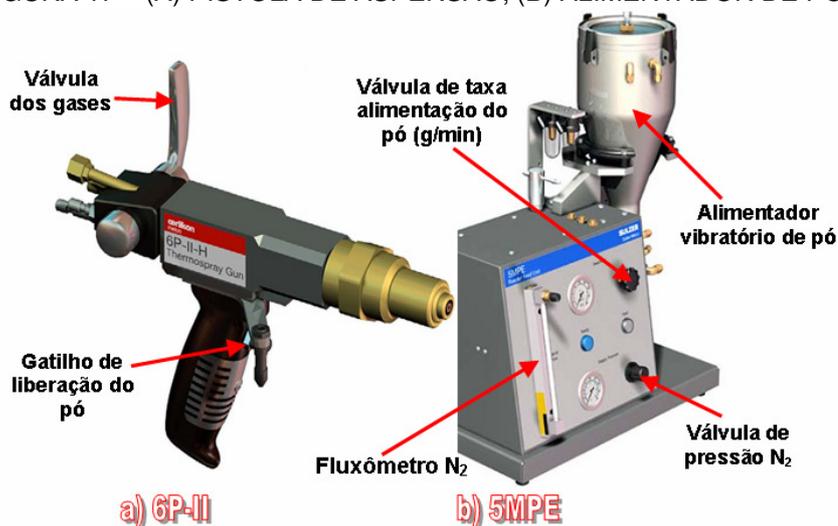
FONTE: O autor (2016).

3.3 EQUIPAMENTOS

No processo de deposição foram utilizadas as instalações do Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagem Especiais - LABATS da Universidade Federal do

Paraná (UFPR), tendo como equipamentos de chama-pó: a unidade alimentadora de pó 5MPE (Figura 17(a)), pistola 6P-II (Figura 17(b)), ambos do fabricante Sulzer Metco.

FIGURA 17 – (A) PISTOLA DE ASPERSÃO; (B) ALIMENTADOR DE PÓ.



FONTE: Adaptado de Metco (2016a).

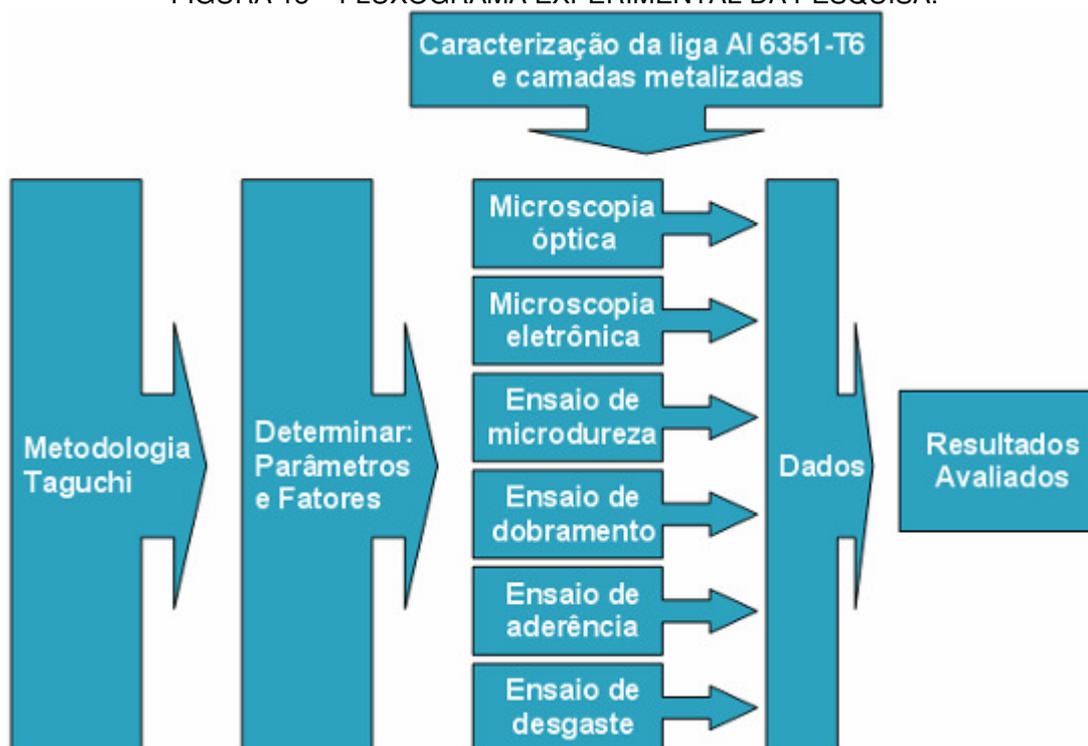
Para o jateamento com alumina na preparação da rugosidade e limpeza do substrato foi utilizado o equipamento marca CMV modelo 65 9075.

3.4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Segundo Paredes (1998), a metodologia Taguchi é apropriada para um planejamento experimental robusto, além de utilizar um arranjo ortogonal eficaz para os fatores de ensaios. Na Figura 18, o fluxograma contempla a utilização da metodologia Taguchi, bem como as etapas de caracterização após a realização dos revestimentos nas amostras.

A metodologia Taguchi já se mostrou eficiente na otimização de parâmetros de aspersão térmica, onde em um estudo realizado por Sucharski (2016) para a deposição da liga metálica FeMnCrSi com adição níquel e boro pelo processo chama-pó, obteve em média 20 % de fração de óxidos e em um ensaio de confirmação dos melhores parâmetros analisados na metodologia Taguchi conseguiu-se 8,94 % de porcentual de óxidos.

FIGURA 18 – FLUXOGRAMA EXPERIMENTAL DA PESQUISA.



FONTE: O autor (2016).

No planejamento experimental foram levantados os fatores variáveis e fixos, de forma a consolidar as atividades de investigação no processo de revestimento por chama-pó. Para tanto, a metodologia objetiva em identificar as respostas, fatores de controle e fatores de ruído, como se pode descrever a seguir:

- Respostas: aderência, índice de porosidade, avaliar a resistência ao desgaste, aderência por dobramento, teor de óxidos, após obter uma otimização adequada ao processo de deposição da liga stellite 6 no substrato de alumínio.
- Fatores de controle: discriminados no Quadro 1.
- Fatores de ruído: as incertezas levantadas nos fatores de controle determinam os fatores de ruído.

QUADRO 1 – FATORES DE CONTROLE.

Fatores	Chama-pó
A	Distância de deposição
B	Pré-aquecimento
C	Fluxo oxigênio
D	Fluxo acetileno
E	Fluxo do nitrogênio
F	Taxa alimentação do pó
G	Pressão oxigênio

FONTE: O autor (2016).

Foram selecionados os fatores (respostas) conforme Quadro 2, para a realização da deposição das camadas de revestimentos pelo processo chama-pó.

QUADRO 2 – FATORES (RESPOSTAS).

Chama-pó
Porosidade
Teor de óxidos
Aderência
Aderência por dobramento
Desgaste

FONTE: O autor (2016).

Após a definição dos fatores de controle, a etapa seguinte consiste em organizar a matriz de arranjos ortogonais (Taguchi), de acordo como os fatores de controle e ruído adequados. Na Tabela 5, os dados foram distribuídos em sete fatores de controle, sendo dois níveis de variação para cada fator. Os fatores e níveis foram recomendados na literatura do fabricante Metco (2001) para pistola de aspersão 6P-II. O gás de transporte do pó foi utilizado o nitrogênio (N₂) com pressão de 49 Psi, ajustado diretamente na unidade alimentadora de pó 5MPE.

TABELA 5 – FATORES PARA DEPOSIÇÃO DO SF₆ POR (FS).

Fator	Nível I	Nível II
Distância de deposição	150 mm	200 mm
Pré-aquecimento	Temperatura ambiente	120 °C
Fluxo oxigênio	85 pes ³ /h	80 pes ³ /h
Fluxo acetileno	50 pes ³ /h	40 pes ³ /h
Fluxo do nitrogênio	12 pes ³ /h	15 pes ³ /h
Taxa alimentação do pó	75 g/min	90 g/min
Pressão oxigênio	32 psi	27 psi

FONTE: O autor (2016).

Na Tabela 6, os dados foram combinados, de forma que as interações dos níveis e fatores são conforme o arranjo ortogonal L8 de Taguchi.

TABELA 6 – NÍVEIS E FATORES NO ARRANJO L8 TAGUCHI PARA DEPOSIÇÃO DO SF6.

Amostras (FS)	Fatores de controle						
	Distância [mm]	Preaque. [°C]	Fluxo O ₂ [pes ³ /h]	Fluxo C ₂ H ₂ [pes ³ /h]	Fluxo N ₂ [pes ³ /h]	Taxa Alim. Pó [g/min]	Pressão O ₂ [psi]
F1	150	T.amb.	85	50	12	75	32
F2	150	T.amb.	85	40	15	90	27
F3	150	120	80	50	12	90	27
F4	150	120	80	40	15	75	32
F5	200	T.amb.	80	50	15	75	27
F6	200	T.amb.	80	40	12	90	32
F7	200	120	85	50	15	90	32
F8	200	120	85	40	12	75	27

FONTE: O autor (2016).

Para o jateamento foram programados os seguintes parâmetros: o óxido de alumínio com granulometria de 20 Mesh, pressão de 30 psi, ângulo de 90 graus e distância da pistola de 100 mm. Segundo a norma Militar Standard 2138a (1992), a faixa recomendada de alumina para jateamento em alumínio é de 16-30 Mesh. O procedimento de jateamento garantiu, em todos os substratos, uma superfície com grau de limpeza Sa3, comparado com os padrões de qualidade superficial publicados no Anexo C, conforme norma SABESP Nts085 (2001). A faixa de rugosidade Ry recomendada a ser atingida corresponde entre 60 a 80 µm, conforme literatura da Mellali *et al.* (1997). O equipamento utilizado na medição de rugosidade da superfície do substrato foi do fabricante marca Mitutoyo modelo SJ-201.

A respeito da camada depositada, na Tabela 7 são apresentados valores da camada mínima ou faixa de revestimento de acordo com a norma e tipo de inspeção a realizar. No Apêndice A é apresentado à forma como as camadas foram aplicadas nos experimentos. As temperaturas de deposição (próximo dos 200 °C) e pré-aquecimento (120 °C) foram controladas por pirômetro eletrônico nas amostras.

TABELA 7 – FAIXA E CAMADA MÍNIMA DE APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO.

Norma	Aderência	Dobramento	Faixa de espessura
Petrobrás N-2568-b	300-400 µm	> 225 µm	225-500 µm
Mil-Std-2138a	-	175-250 µm	250-400 µm
ASTM C633	> 380 µm	-	-

FONTE: O autor (2017).

3.5 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Para a caracterização dos revestimentos foram realizadas as seguintes análises e ensaios:

- medição da rugosidade dos experimentos jateados, conforme a norma ABNT NBR 4287 (2002);
- medição da espessura dos revestimentos depositados por micrômetro;
- preparação metalográfica, onde os corpos de prova foram cortados perpendicularmente em relação ao revestimento e embutidos em baquelite. Após o embutimento as amostras foram lixadas com lixas 120, 220, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 e polidas com alumina 1 μm em feltro molhado e efetuado a limpeza em equipamento ultrassom, conforme norma ASTM E3 (2012);
- análise química realizada em espectrografia por energia dispersiva (EDS);
- análise de microestrutura, ambos de microscopia ótica (MO) e eletrônica por varredura (MEV);
- quantificação de poros e óxidos via análise de imagens;
- ensaios de aderência, tanto por tração como por dobramento, nos revestimentos depositados;
- ensaio de desgaste em experimentos com revestimento;
- ensaio de microdureza no revestimento e substrato Al.

3.5.1 Análise química por EDS

A caracterização dos revestimentos por análise química foi realizada por mapeamento do revestimento e substrato, por ponto localizado na fase metálica do revestimento (stellite 6) e óxidos formados. Ainda, o mapeamento químico foi realizado na superfície da amostra utilizada no ensaio de aderência por tração já sem o revestimento.

3.5.2 Análise de microestrutura e morfologia

Nesta análise de microestrutura e morfologia dos revestimentos foram utilizados os microscópios MO e o MEV.

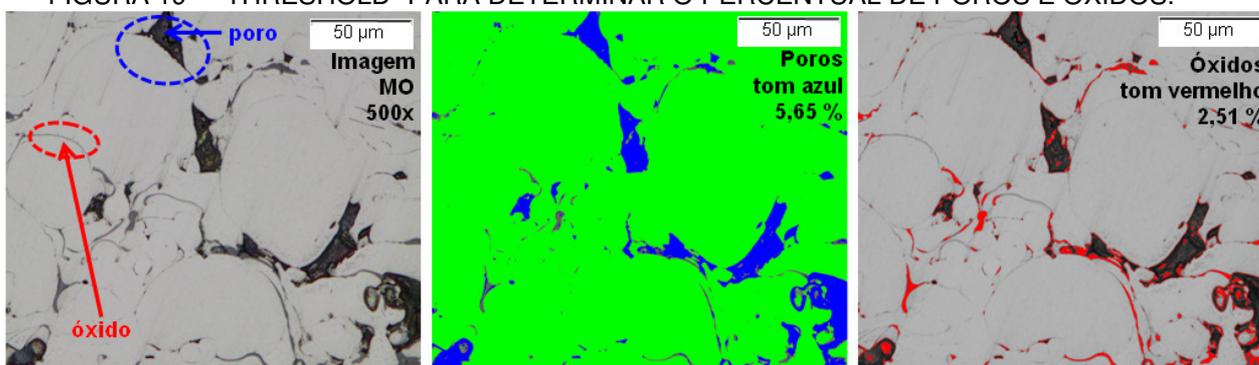
3.5.2.1 Quantificação de poros e óxidos

As análises para calcular os percentuais de porosidade e o teor de óxidos foram obtidas por meio da conversão das imagens (MO) de tons cinza para 8 bits, na sequência as imagens são convertidas para três representações de cores distintas: azul (poros), vermelho (óxidos) e verde (fase metálica). Esta análise está no contexto do método B da norma ASTM E2109 (2012).

Com a definição de cada microconstituente por meio da ferramenta “*threshold*” (Figura 19), caracterizado pelos limites do tom de cinza dos poros, óxidos e fase metálica, calcula-se o percentual de cada fase na imagem. Nesta técnica, foram utilizadas imagens de seção transversal, com ampliações de 500x, para análise da fração de óxidos e para a identificação de poros na estrutura.

Para tanto, a área relativa de cada cor foi então calculada, definindo-se o percentual de cada microconstituente. Para este procedimento foi utilizado o software de análise de imagens Image J®. Os valores foram medidos por meio da análise de 6 imagens para cada revestimento depositado.

FIGURA 19 – “THRESHOLD” PARA DETERMINAR O PERCENTUAL DE POROS E ÓXIDOS.



FONTE: O autor (2017).

3.5.3 Análise estatística do planejamento Taguchi

Foram utilizadas as seguintes ferramentas estatísticas para tomada de decisão referente aos resultados levantados nos ensaios e análises:

- a análise de variância permite identificar a significância de cada fator de controle sobre o fator de resposta, ou seja, facilita a identificação de qual fator de controle exerce de forma significativa alguma influência sobre a variável que está sendo estudada;
- a análise de ranqueamento dos fatores de controle tem como objetivo identificar qual é o mais influente entre os que se mostraram significativos. Em conjunto ao ranqueamento, as análises gráficas destes efeitos permitem que seja identificado qual é o melhor nível de cada fator de controle;
- para análise de diferença significativa entre os níveis, faz-se necessário um teste de comparação entre as incertezas levantadas nos fatores de controle. Este teste é conhecido como diferença honestamente significativa (*Honestly Significant Difference* - HSD) e o teste Tukey faz parte do HSD;

As análises supracitadas foram executadas pelo aplicativo de análise estatística, o Minitab® 17.1.0, que teve um papel importante no auxílio de todo planejamento Taguchi, além de facilitar a construção dos gráficos.

3.5.4 Ensaio de aderência

3.5.4.1 Ensaio de aderência por tração

Para o ensaio de aderência por tração foram preparados corpos de prova conforme citado na seção 3.2 (configuração das amostras) para cada combinação do Taguchi L8. Neste ensaio todos os procedimentos e norma foram citados no Apêndice B de ensaio preliminar de aderência.

3.5.4.2 Ensaio de aderência por dobramento

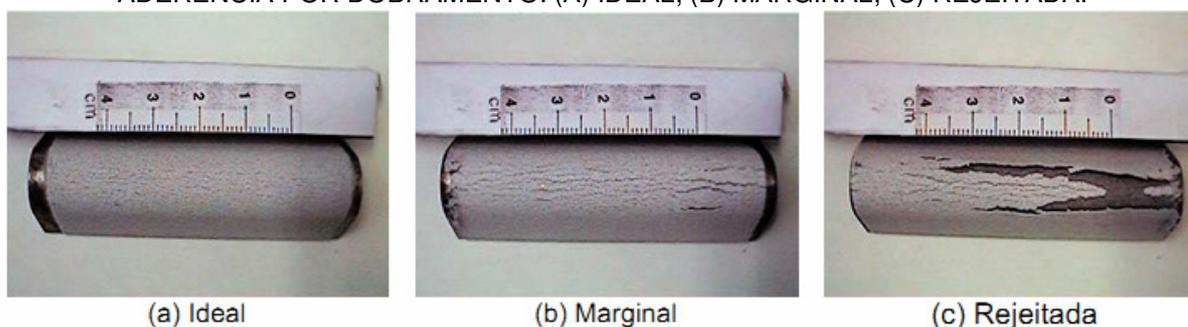
Neste ensaio de dobramento foram utilizados corpos de prova conforme citado na seção 3.2 (configuração das amostras) para cada combinação do Taguchi L8. A Tabela 7 estabelece as medidas mínimas para espessura do revestimento, de acordo com as normas Militar Standard 2138a (1992) e Petrobrás N-2568-b (2011). O critério de avaliação dos ensaios de dobramento é apresentado pelo Quadro 3. Os aspectos de controle visual foram avaliados por fotos ampliadas em até 20x e a base de comparação é ilustrada pelas Figuras 20(a)(b)(c) de acordo com as normas 2138a e M-2568-b (MILITAR STANDARD, 1992; PETROBRAS, 2011). Além disso, a quantificação das condições qualitativas de cada ensaio de dobramento realizado foi estabelecida por um indicador “Grau” de severidade para as classificações “Ideal”, “Marginal” e “Rejeitada” (Quadro 4). Ainda, os dados “Grau” de severidade foram imputados mecanicamente no aplicativo Minitab® 17.1.0 para posterior análise de estatística Taguchi.

QUADRO 3 – CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DOS ENSAIOS DE DOBRAMENTO.

Condição	Aparência da superfície
Ideal	Sem trincas superficiais
Marginal	Com trincas, sem deslocamento da camada.
Rejeitada	Com trincas e deslocamento da camada.

FONTE: Adaptado de Petrobrás N-2568-b (2011).

FIGURA 20 – PADRÕES PARA AVALIAÇÃO POR CONTROLE VISUAL DOS ENSAIOS DE ADERÊNCIA POR DOBRAMENTO: (A) IDEAL; (B) MARGINAL; (C) REJEITADA.



FONTE: Adaptado de Petrobrás N-2568-b (2011).

QUADRO 4 – AVALIAÇÃO QUALIQUANTITATIVO DOS ENSAIOS DE DOBRAMENTO.

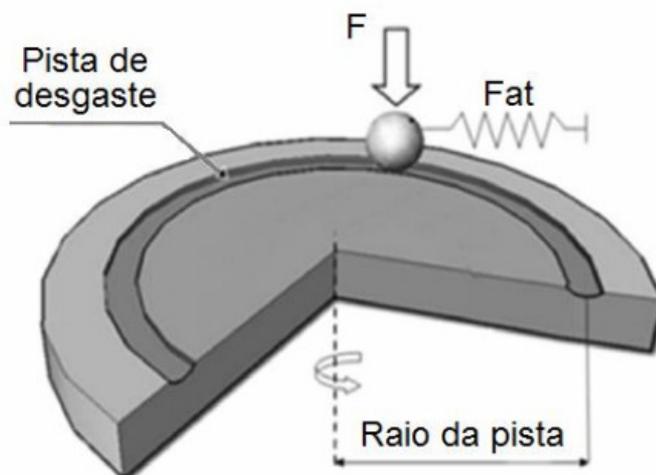
Condição	Aparência da superfície	Grau
Ideal	Sem trincas superficiais	13 - 14
Marginal	Com trincas, sem deslocamento da camada.	3 - 12
Rejeitada	Com trincas e deslocamento da camada.	1 - 2

FONTE: Adaptado de Petrobrás N-2568-b (2011).

3.5.5 Ensaio de desgaste

A análise do ensaio de desgaste por deslizamento utiliza a configuração de um contra-corpo sólido que permanece em contato deslizante sobre um disco rígido por um período tempo, conforme Figura 21. Neste procedimento foram preparados corpos de prova nas dimensões com diâmetro 25,4 mm e altura de 35 mm para as combinações Taguchi L8 com revestimento e um experimento diretamente na superfície de alumínio (sem revestimento). Os ensaios de desgaste foram realizados segundo instruções da norma ASTM G99 (2010). As superfícies a serem ensaiadas das amostras com revestimentos foram retificadas para adequação da rugosidade (R_a entre 0,5 a 2,1 μm) e na seqüência limpos com acetona em equipamento de ultrassom.

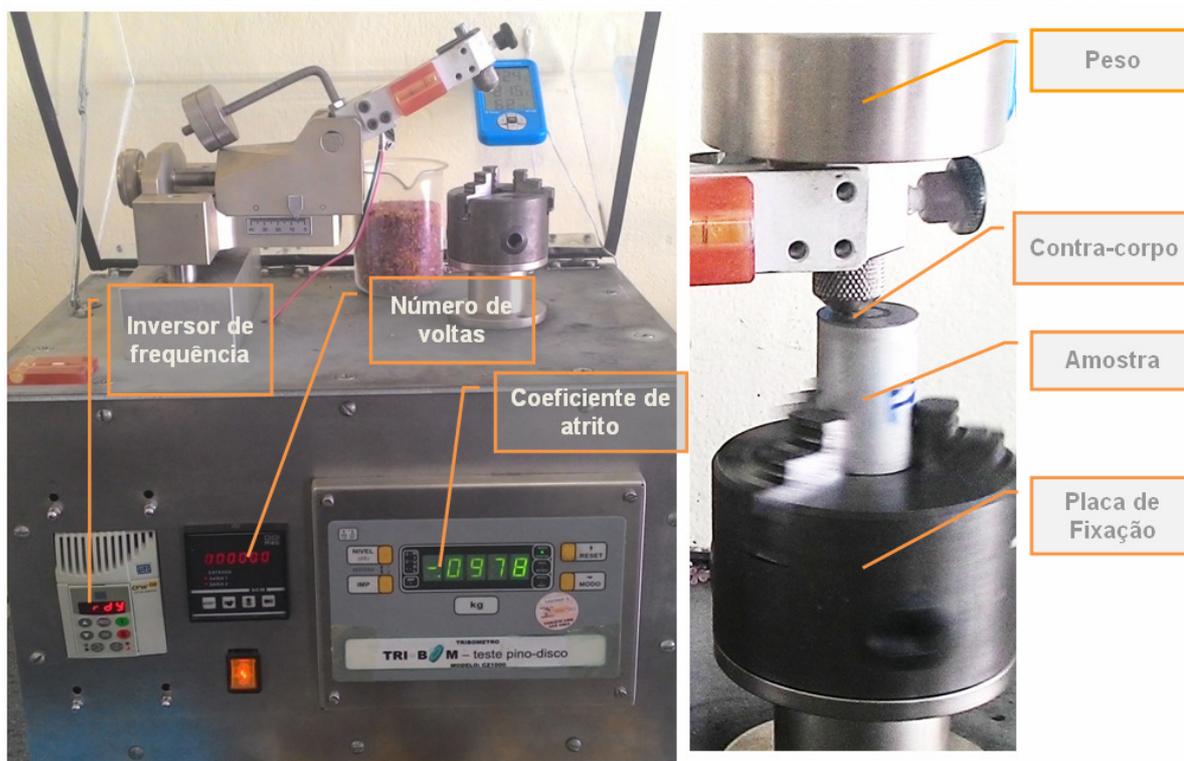
FIGURA 21 – MODELO DE ENSAIO POR DESLIZAMENTO PINO-SOBRE-DISCO



FONTE: Souza (2014).

O ensaio de desgaste foi executado em um tribômetro próprio para o ensaio pino-sobre-disco desenvolvido na Universidade Estadual de Santa Catarina - UDESC, conforme detalha a Figura 22.

FIGURA 22 – TRIBÔMETRO PARA ENSAIO DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO.



FONTE: O autor (2017).

Os ensaios de desgaste foram realizados de acordo com os parâmetros no Quadro 5 e para cada condição de revestimento L8 Taguchi ensaiou duas réplicas. O contra-corpo utilizado foi uma esfera de alumina polida com diâmetro de 6 mm.

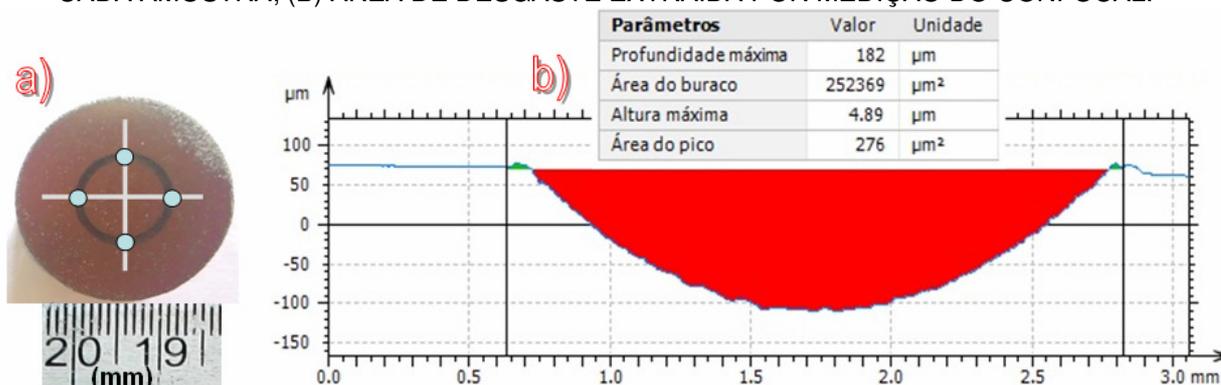
QUADRO 5 – PARÂMETROS UTILIZADOS NO ENSAIO DE DESGASTE.

Variáveis	Parâmetros
Carga sobre o pino	10 N
Velocidade linear	0,1 m/s
Distância de deslizamento	1000 m
Raio da pista de desgaste	6 mm

FONTE: O autor (2017).

O volume de material removido foi obtido por medições da pista de desgaste em quatro pontos distintos realizadas por microscopia confocal, conforme mostra a Figura 23(a). Os dados levantados das medições foram tabulados mecanicamente no aplicativo Microsoft Office Excell® e calculado a área média transversal desgastada nos quatro pontos de leitura e integra no comprimento total da pista de desgaste ($2\pi R$), sendo R o raio da pista. A Figura 23(b) denota um exemplo de gráfico da seção transversal da pista com desgaste, obtido pela medição no confocal e processado pelo Mountains Map Software®.

FIGURA 23 – MEDIÇÃO DA PISTA DE DESGASTE: (A) DETALHE DOS PONTOS MEDIDOS EM CADA AMOSTRA; (B) ÁREA DE DESGASTE EXTRAÍDA POR MEDIÇÃO DO CONFOCAL.



FONTE: O autor (2017).

3.5.6 Ensaio de microdureza

A medição da microdureza foi realizada de acordo com a norma ASTM E384 (2012), com microdurômetro Shimadzu HMV 200. Em cada revestimento, de acordo com o arranjo ortogonal L8 Taguchi, realizou-se no mínimo 5 indentações em partículas aderidas, não fundidas ou parcialmente fundidas e óxidos, obtendo-se o valor de microdureza média na posição estudada dos respectivos experimentos. A carga adotada foi de 200 g no revestimento e 25 g no substrato, tempo de indentação de 15 segundos e distância entre indentações de 2,5 a 3 diagonais de indentação.

No perfil de microdureza do alumínio 6351-T6, a primeira medida foi realizada cerca de 20 μm próximo da região de interface com o revestimento e a partir desta indentação de referência foi atribuído um avanço gradual perpendicular ao centro do corpo de prova com espaçamentos de 20 μm até uma profundidade de aproximadamente 100 μm (5 medições). Na seqüência os dados foram plotados em gráfico com desvio padrão para comparação da microdureza entre as amostras.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste início, são apresentados os resultados da análise da rugosidade, espessura, caracterização química e morfologia dos revestimentos da liga stellite 6 aplicados em substratos de alumínio pelo processo chama-pó. Na sequência desse trabalho, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de aderência por tração e dobramento, desgaste e microdureza.

4.1 ANÁLISE DA RUGOSIDADE E ESPESSURA DO REVESTIMENTO

Lima e Trevisan (2007) resumizam que a faixa entre 2,5 e 13 μm dos valores de rugosidade média (Ra) para o substrato, são recomendados para a maioria dos revestimentos. Ainda, Metco (2016b), sugere Ra entre 9 e 11 μm para chama-pó com tocha 5P-II ou 6p-II na aplicação do revestimento liga de cobalto (45C-NS, compatível com stellite 6). Para o valor de rugosidade (Ry), Mellali *et al.* (1997) mostra uma faixa de Ry entre 60 e 80 μm , de forma a minimizar a contaminação por impurezas no substrato e garantir uma boa aderência no alumínio.

Além disso, a norma Petrobrás N-2568-b (2011), preconiza a espessura do revestimento na faixa de aceitação entre 225 e 500 μm . Já a norma ASTM C633 (2008) recomenda o mínimo de revestimento em 380 μm .

No Quadro 6 é possível verificar a rugosidade das amostras para ensaio de aderência por dobramento que foram jateadas para cada combinação Taguchi, e a rugosidade apresentou parâmetros comparáveis à literatura de Mellali *et al.* (1997).

QUADRO 6 – RUGOSIDADE DO SUBSTRATO E ESPESSURA DOS REVESTIMENTOS ASPERGIDOS PARA OS ENSAIOS DE DOBRAMENTO.

Amostras	Média Ra (μm)	Média Ry (μm)	Faixa da Espessura com revestimento (μm)
F1	11,45 \pm 1,00	62,95 \pm 3,93	260-270
F2	11,22 \pm 1,49	63,61 \pm 6,26	236-386
F3	11,16 \pm 0,91	62,96 \pm 2,25	372-440
F4	11,72 \pm 0,75	66,49 \pm 5,45	196-296
F5	13,06 \pm 1,10	70,44 \pm 4,90	264-303
F6	11,69 \pm 1,03	68,37 \pm 3,82	331-347
F7	11,69 \pm 1,16	63,54 \pm 6,13	294-304
F8	11,34 \pm 0,99	61,60 \pm 3,80	360-367

FONTE: O autor (2017).

Os experimentos para ensaio de aderência por dobramento foram aplicados com 1,5 passes de revestimento, enquanto as amostras para ensaio de aderência por tração foram depositadas com 2 passes. O Apêndice A ilustra o detalhamento da formação de camadas nos revestimentos. O Quadro 7 apresenta amostras para ensaio de aderência por tração com rugosidade e espessura conforme literatura.

QUADRO 7 – RUGOSIDADE DO SUBSTRATO E ESPESSURA DOS REVESTIMENTOS ASPERGIDOS PARA OS ENSAIOS DE ADERÊNCIA POR TRAÇÃO.

Amostras	Média Ra (μm)	Média Ry (μm)	Faixa da Espessura com revestimento (μm)
F1	12,24 \pm 0,93	66,17 \pm 5,64	386-408
F2	13,92 \pm 0,79	66,85 \pm 5,30	350-410
F3	12,60 \pm 0,29	66,67 \pm 5,26	300-378
F4	13,76 \pm 0,74	74,45 \pm 1,50	380-392
F5	13,05 \pm 0,86	66,94 \pm 6,01	374-388
F6	12,26 \pm 0,83	67,16 \pm 8,39	416-664
F7	12,87 \pm 0,82	67,81 \pm 5,08	354-387
F8	13,12 \pm 1,17	69,35 \pm 4,21	324-402

FONTE: O autor (2017).

A rugosidade mostrada no Quadro 7 denota valores e desvio padrão dentro das recomendações especificadas nas literaturas supracitadas, isto de fato, valida os parâmetros estipulados durante o planejamento com os resultados alcançados nos experimentos, proporcionando um grau de concordância entre ensaio prático e referencial teórico.

Destaca-se nestes resultados a espessura para a amostra F6 que está acima da faixa recomendada pela Petrobrás N-2568-b (2011), porém a norma ASTM C633 (2008), que regula os procedimentos de medição da aderência por ensaio de tração, preconiza que a espessura pode estar acima de 380 μm .

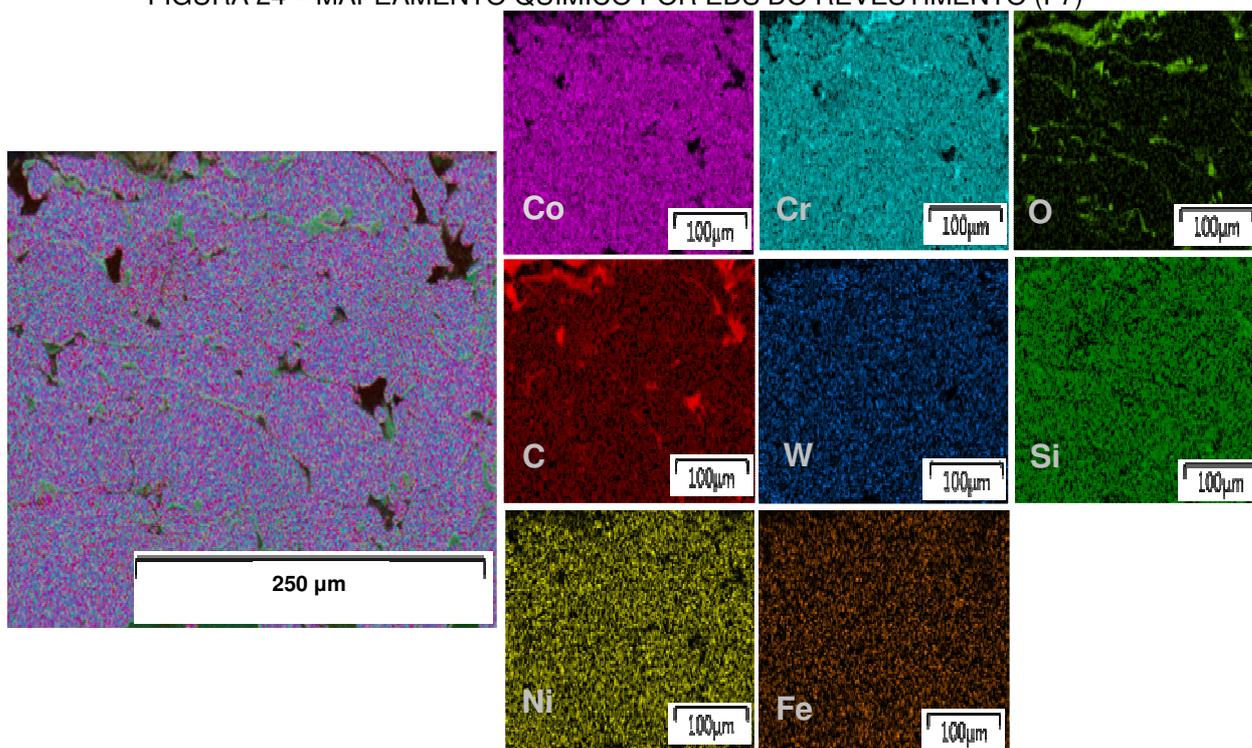
4.2 ANÁLISE QUÍMICA POR EDS

Nos mapas e pontos de composições químicas, obtidos a partir do substrato e revestimento, por meio de técnica por EDS, foram possíveis observar a distribuição dos elementos químicos na área analisada. Os espectros mostrados na Figura 24 e no ponto 2 da Figura 25 classificam os elementos químicos que compõem o revestimento da superliga stellite 6 (Co-Cr-W-Si-Ni-Fe). A quantidade expressiva mapeada de carbono representa os poros nos revestimentos, devido à resina

(baquelite) englobar este elemento químico e no embutimento das amostras houve a injeção do mesmo.

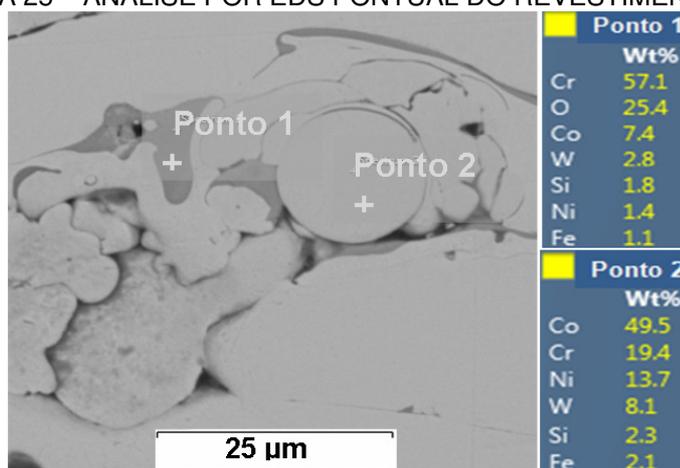
Segundo Sucharski (2016), os óxidos interlamelares são compostos complexos e podem ser apresentados como, por exemplo, $MxOx$, onde “M” caracteriza uma combinação de elementos químicos metálicos presentes no revestimento. Na Figura 25, no ponto 1, é possível verificar que o óxido é rico em Cr e O, no entanto, pobre em Co principal elemento da liga stellite 6. Em comparação com a Figura 24, perceber-se também que os mapas de Co, Cr e O correspondem à afirmação citada acima no ponto 1 da Figura 25. Todos os experimentos tiveram comportamentos muito próximos no mapeamento dos elementos químicos por EDS.

FIGURA 24 – MAPEAMENTO QUÍMICO POR EDS DO REVESTIMENTO (F7)



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 25 – ANÁLISE POR EDS PONTUAL DO REVESTIMENTO (F7)

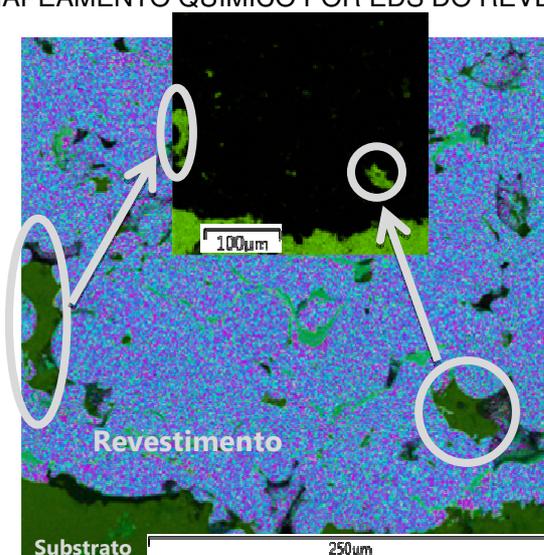


FONTE: O autor (2017).

Ao observar os resultados de análise por EDS pode-se perceber que a liga Stellite 6 sofre mudanças de alguns de seus elementos químicos, o que é esperado na aspersão térmica, estas variações de composição ocorrem devido a redistribuição do percentual de oxigênio.

A Figura 26 apresenta partículas de (Al) retiradas da superfície do substrato durante o lixamento e alojando-se no revestimento. Este fato ocorreu devido o substrato de alumínio ser dúctil e existir poros no revestimento de stellite 6. A ocorrência de acúmulo de alumínio nos revestimentos de stellite 6 foram apresentados nos experimentos (F1), (F3) e (F7).

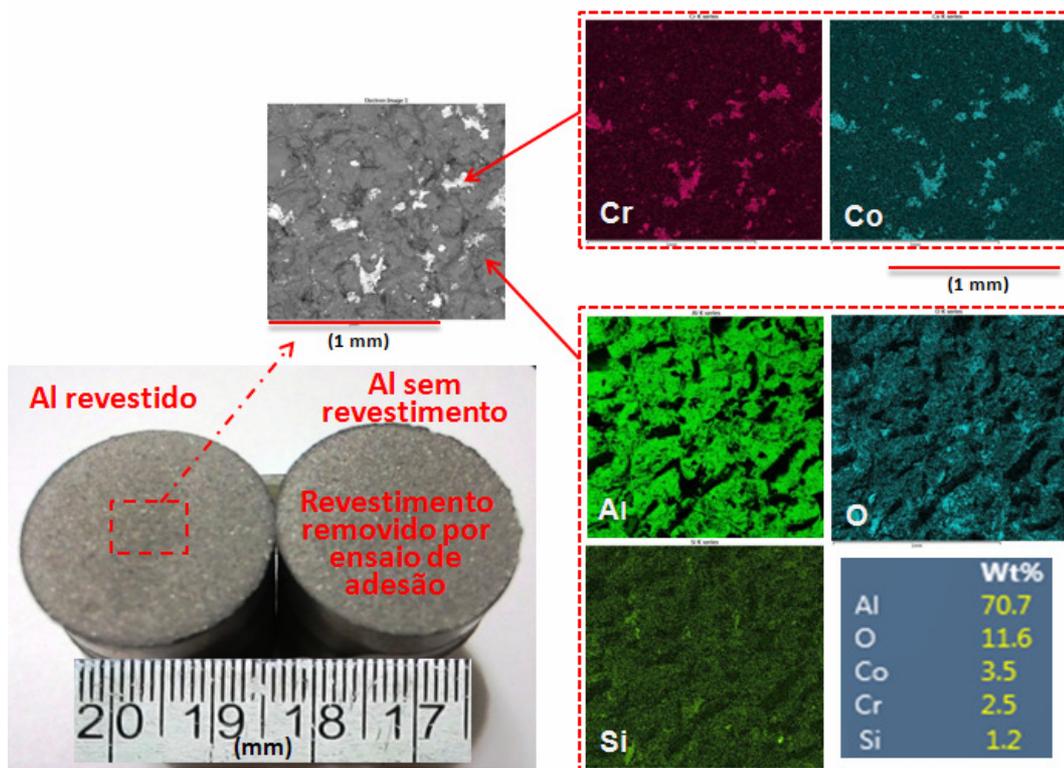
FIGURA 26 – MAPEAMENTO QUÍMICO POR EDS DO REVESTIMENTO (F1)



FONTE: O autor (2017).

A Figura 27 apresenta o mapeamento por EDS, após a realização do ensaio de aderência por tração, o experimento (F7) apresenta próximo de 6 % de peso de Co e Cr nos vales da rugosidade no alumínio já sem revestimento. Isto de fato justifica a coloração azul claro na superfície das amostras que foram revestidas.

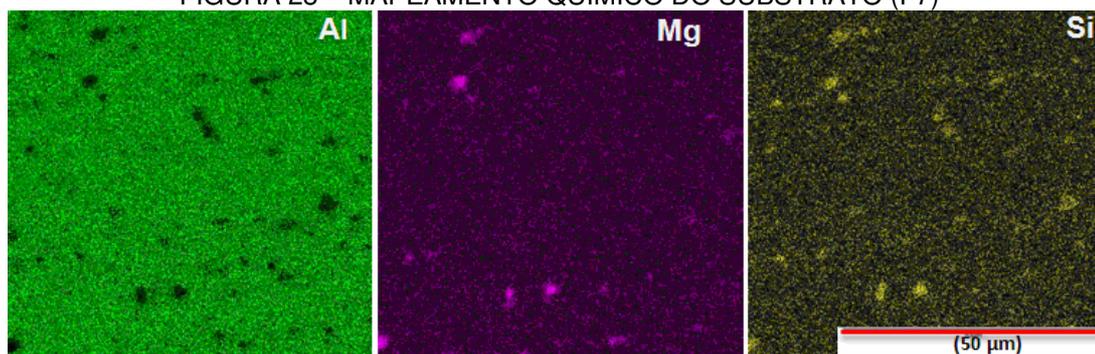
FIGURA 27 – MAPEAMENTO QUÍMICO DO REVESTIMENTO APÓS ENSAIO DE ADESÃO (F7)



FONTE: O autor (2017).

No substrato não há variação significativa na composição de seus elementos (Figura 28) como o alumínio matriz, Mg e o Si. Na interface substrato/revestimento verificou-se um pouco de óxidos de alumínio para todos os experimentos. O alumínio é um metal altamente reativo especialmente com oxigênio, o qual gera óxidos, geralmente chamado de alumina (RODRIGUEZ, 2003).

FIGURA 28 – MAPEAMENTO QUÍMICO DO SUBSTRATO (F7)



FONTE: O autor (2017).

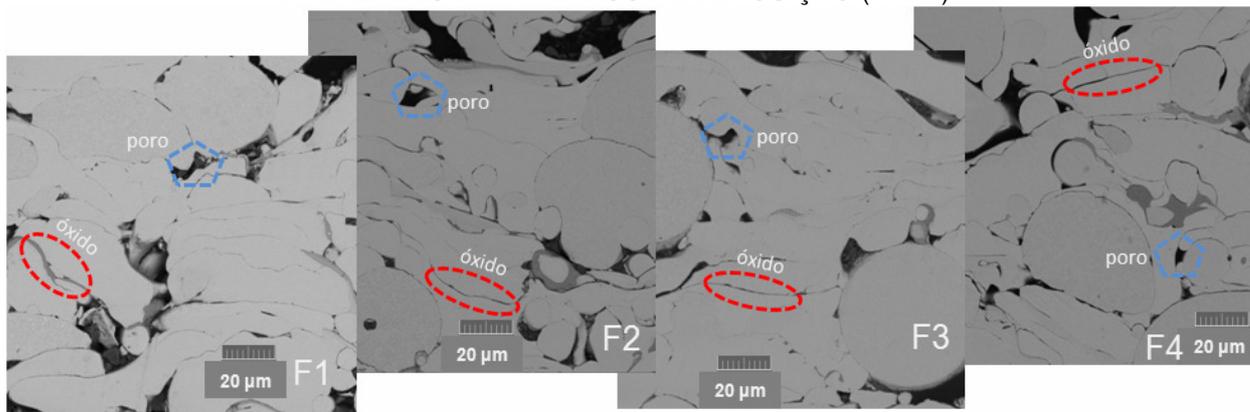
Na microestrutura do alumínio 6351, percebem-se os precipitados de Mg_2Si (pontos pretos no mapa do Al - Figura 28), conforme relata a literatura (PRASAD; RAO, 2015; KAUFMAN, 2000). A Figura 28 esboça uma ampliação da área depositada por stellite 6, conforme mostra a Figura 27 após o deslocamento quase que total do revestimento. Portanto, é possível descrever que mesmo sobre a influência da aspensão térmica por chama-pó a estrutura do Al- Mg_2Si foi mantida. Além disso, na Figura 27 verifica-se no mapeamento de oxigênio uma composição próximo de 12 %. Neste sentido, caracteriza-se a formação de oxidação formada pelas variações de temperatura que ocorrem durante o pré-aquecimento (LIMA; TREVISAN, 2007).

No mapeamento químico do revestimento stellite 6 (Figura 25 – ponto 2), observa-se que os percentuais estão de acordo com a literatura discriminada no Anexo A, conforme fabricante Deloro.

4.3 ANÁLISE DE MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS

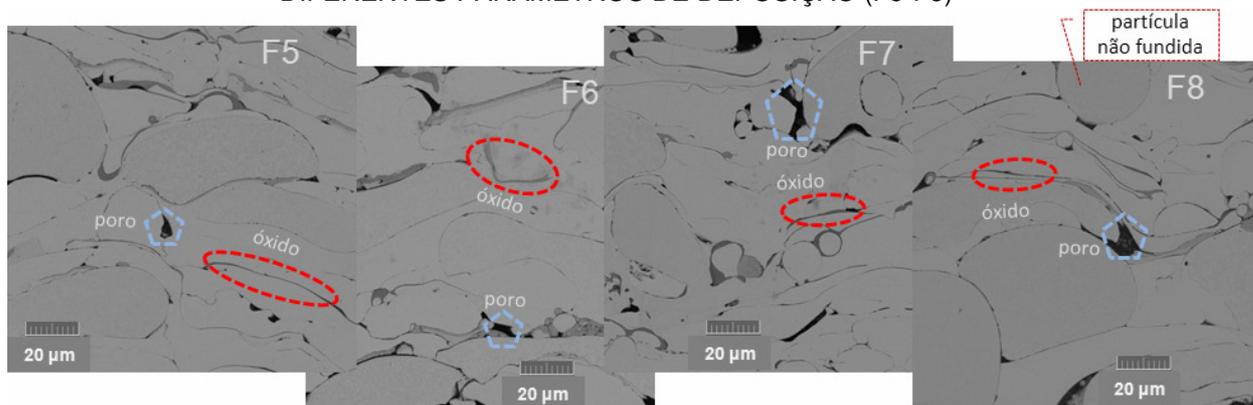
As Figuras 29 e 30 apresentam micrografias obtidas por MEV, com ampliação de 2000x dos experimentos F1 até F8. As morfologias das amostras são formadas por poros entre as “panquecas”, destacados por linhas pontilhadas na cor vermelha e o teor de óxidos é indicado também por linhas pontilhadas na cor azul. Além disso, existem partículas grandes não aderidas nos revestimentos, especialmente para as amostras F3 e F8, isto indica que a temperatura no pó metálico aspergido não foi alta o suficiente para melhorar a molhabilidade das partículas maiores. A grande influência da variação dos parâmetros na morfologia dos revestimentos pelo processo chama-pó pode ser observada nas Figuras 29 e 30. Nestas figuras percebem-se diferentes níveis de teor de óxido e porosidade para diferentes arranjos L8 ortogonal Taguchi. A principal diferença pode ser evidenciada pela porosidade que difere nos experimentos, a qual determina uma morfologia típica para as amostras entre F1 e F4 e também compreendidas entre F5 e F8.

FIGURA 29 – SECÇÃO TRANSVERSAL DAS MORFOLOGIAS DOS REVESTIMENTOS COM DIFERENTES PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO (F1-F4)



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 30 – SECÇÃO TRANSVERSAL DAS MORFOLOGIAS DOS REVESTIMENTOS COM DIFERENTES PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO (F5-F8)



FONTE: O autor (2017).

Em geral, pode-se comentar que a morfologia de todas as microestruturas observadas apresenta uma estrutura homogênea, sem trincas e concentração de óxidos e porosidade. Nos tons de cinza mais claros nas Figuras 29 e 30, são observadas as panquecas que apresentam geometria alongada paralela à superfície do substarto e formadas pelo impacto de partículas fundidas. Ainda, nos tons de cinza mais escuro, se encontram os filmes de óxidos (interlamelares), por fim, a porosidade ou microporos são localizadas pelo tom preto entre as panquecas e filmes de óxidos conforme descritos na literatura (SUCHARSKI, 2016).

4.3.1 Quantificação de poros e fração de óxidos

4.3.1.1 Porosidade

A Tabela 8 apresenta os resultados das medições da porosidade, as quais foram atribuídas valores médios e desvio padrão respectivamente.

TABELA 8 – RESULTADOS DE POROSIDADE PARA AS AMOSTRAS (L8 DO TAGUCHI).

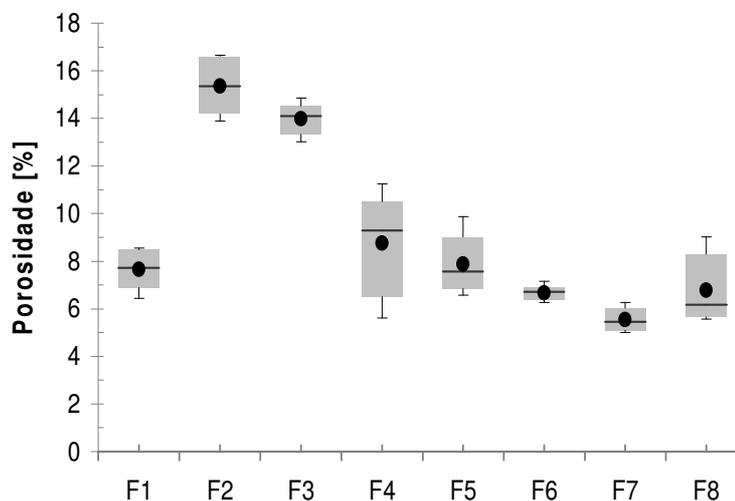
Amostras (FS)	Fatores de controle							Porosidade* [%]	
	Distância [mm]	Preaque. [°C]	Fluxo	Fluxo	Fluxo	Taxa Alim. Pó	Pressão O ₂ [psi]	Média	Desvio Padrão
			O ₂ [pes ³ /h]	C ₂ H ₂ [pes ³ /h]	N ₂ [pes ³ /h]	[g/min]			
F1	150	T.amb.	85	50	12	75	32	7,66	0,83
F2	150	T.amb.	85	40	15	90	27	15,36	1,23
F3	150	120	80	50	12	90	27	13,98	0,68
F4	150	120	80	40	15	75	32	8,75	2,14
F5	200	T.amb.	80	50	15	75	27	7,88	1,27
F6	200	T.amb.	80	40	12	90	32	6,68	0,32
F7	200	120	85	50	15	90	32	5,55	0,50
F8	200	120	85	40	12	75	27	6,78	1,43

FONTE: O autor (2017)

*Medidas de porosidade sobre as imagens geradas por MO, com ampliação de 500x.

O Gráfico 11 apresenta os resultados de percentual de porosidade, de forma a observar os valores médios próximos dos valores medianos, e ainda, para os casos de maior dispersão dos dados não existem pontos discrepantes.

GRÁFICO 11 – BOXSPLOT PARA OS RESULTADOS DE POROSIDADE
SIMBOLOGIA: '◆' = MÉDIA; '—' = MEDIANA.



FONTE: O autor, 2017.

A porosidade para o processo chama-pó estende-se em uma faixa de 10 a 20 % (PAWLOWSKI, 2008; PAREDES, 1998), o que demonstra que a maioria das medições plotadas no Gráfico 11 estão abaixo dos valores relatados por Pawlowski.

No estudo realizado por Lira (2012), os revestimentos metálicos a base de cobalto, aspergidos em alumínio 7475 pelo processo HVOF, tiveram uma porosidade (6,78 % \pm 2,03) para liga 1248 T e (5,53 % \pm 1,48) para liga 1256 F. As amostras F6, F7 e F8 neste estudo, tiveram o mesmo desempenho que as ligas 1248 T e 1256 F, citadas na literatura.

Para as amostras compreendidas entre F1 e F4 observa-se que estão na faixa percentual de porosidade segundo a literatura e F5 a F8 abaixo do mínimo especificado por Pawlowski (2008) e Paredes (1998). A partir do Gráfico 11 se observa que o experimento F7 apresenta uma menor porosidade, indicando que é possível obter redução de poros por meio da variação de níveis de fatores no processo de deposição por chama-pó.

A Tabela 9 apresenta a análise de variância da porosidade percentual sobre os fatores estudados. Neste contexto, permite identificar a significância, ou não, de cada fator em relação ao percentual de porosidade calculado por meio da análise de imagens. Para análise da variância foram definidas e testadas às seguintes hipóteses, conforme Quadro 8.

QUADRO 8 – HIPÓTESES PARA CADA FATOR NO ARRANJO L8 DO TAGUCHI.

Hipóteses	Fatores
H ₀₁	“Distância” não é significativo
H ₁₁	“Distância” é significativo
H ₀₂	“Pré-aquecimento” não é significativo
H ₁₂	“Pré-aquecimento” é significativo
H ₀₃	“Fluxo O ₂ ” não é significativo
H ₁₃	“Fluxo O ₂ ” é significativo
H ₀₄	“Fluxo C ₂ H ₂ ” não é significativo
H ₁₄	“Fluxo C ₂ H ₂ ” é significativo
H ₀₅	“Fluxo N ₂ ” não é significativo
H ₁₅	“Fluxo N ₂ ” é significativo
H ₀₆	“Taxa de alimentação” não é significativo
H ₁₆	“Taxa de Alimentação” é significativo
H ₀₇	“Pressão O ₂ ” não é significativo
H ₁₇	“Pressão O ₂ ” é significativo

FONTE: O autor, 2017.

TABELA 9 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA POROSIDADE PARA OS FATORES, COM NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA DE 95 %.

Fatores	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrados Médios	Valor-F	Valor-P*
Distância	1	267,152	267,152	190,17	0,000
Pré-aquecimento	1	4,725	4,725	3,36	0,074
Fluxo O ₂	1	2,803	2,803	2,00	0,165
Fluxo C ₂ H ₂	1	4,713	4,713	3,35	0,074
Fluxo N ₂	1	4,429	4,429	3,15	0,083
Taxa de alimentação	1	82,687	82,687	58,86	0,000
Pressão O ₂	1	177,178	177,178	126,12	0,000
Erro Residual	40	56,191	1,405		
Total	47	599,878			

FONTE: O autor (2017)

*Sendo o nível de significância de 95%, para valor-P menor que 0,05 é rejeitada a hipótese H_{0x}.

Segundo análise de variância, para todos os fatores que o valor-P é menor que 0,05, são rejeitadas as hipóteses H₀₁, H₀₆ e H₀₇. Portanto, estes fatores são significativos e exercem influência sobre a porosidade. Ainda, os fatores “Pré-aquecimento”, “Fluxo O₂”, “Fluxo C₂H₂” e “Fluxo N₂” o valor-P é maior que 0,05, sendo assim aceitam-se as hipóteses H₀₂, H₀₃, H₀₄ e H₀₅, contudo considera-se que estes fatores não são significativos para a porosidade nos revestimentos.

Com intuito de identificar qual fator exerce maior influência, é possível elencar (ranquear) cada fator em função da diferença (delta) entre os valores médios de cada nível, buscando neste contexto qual fator é mais influente em função desta maior diferença. A Tabela 10 denota o ranqueamento para as médias dos efeitos principais de porosidade percentual, ou seja, ranque igual a 1 significa que este é o fator mais influente para o menor percentual de porosidade.

TABELA 10 – RANQUE DE INFLUÊNCIA DOS FATORES PARA A POROSIDADE MÉDIA.

Nível	Distância	Pré-aquecimento	Fluxo O ₂	Fluxo C ₂ H ₂	Fluxo N ₂	Taxa de alimentação	Pressão O ₂
1	11,439	9,393	9,321	9,393	8,776	7,767	11,001
2	6,720	8,766	8,838	8,766	9,383	10,392	7,158
Delta	4,718	0,628	0,483	0,627	0,607	2,625	3,843
Ranque*	1	4	7	5	6	3	2

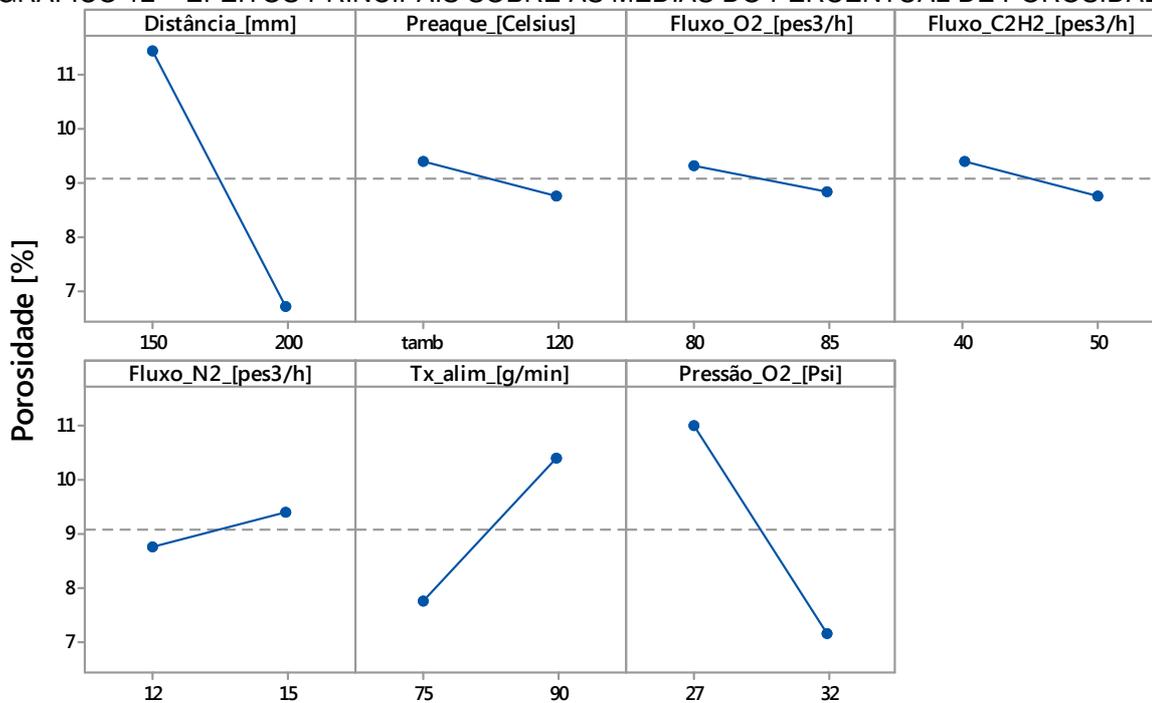
FONTE: O autor (2017)

*Ranque= 1, significa que este é o fator mais influente para a condição de menor porosidade [%].

Assim, a “Distância” apresentou-se como sendo o fator mais influente para a porosidade, seguido pela “Pressão O₂”, “Taxa de alimentação”, “Pré-aquecimento”, “Fluxo C₂H₂”, “Fluxo N₂” e por ultimo a “Fluxo O₂”. O Gráfico 12 apresenta a

influência de cada parâmetro, ou seja, o efeito de cada nível para cada fator sobre a porosidade nos revestimentos.

GRÁFICO 12 – EFEITOS PRINCIPAIS SOBRE AS MÉDIAS DO PERCENTUAL DE POROSIDADE.



FONTE: O autor, 2017.

O Quadro 9 apresenta os resultados do teste de comparação pelo método de Tukey, considera-se um nível de confiança de 95%. Neste método é permitido determinar a diferença significativa entre os níveis. As setas indicam o nível que representa os melhores parâmetros para os menores níveis de porosidade.

QUADRO 9 – TESTE DE COMPARAÇÃO PELO MÉTODO DE TUKEY PARA POROSIDADE.

Fator	Nível	Média [%]	Agrupamento*
Distância [mm]	1 150	11,4387	A
	2 200	6,7204	B ←
Pré-aquecimento [°C]	1 tamb	9,39333	A
	2 120	8,76583	A ←
Fluxo O ₂ [pes ³ /h]	1 80	9,32125	A
	2 85	8,83792	A ←
Fluxo C ₂ H ₂ [pes ³ /h]	1 40	9,39292	A
	2 50	8,76625	A ←
Fluxo N ₂ [pes ³ /h]	1 12	8,77583	A
	2 15	9,38333	A ←
Taxa de alimentação pó [g/min]	1 75	7,7671	B ←
	2 90	10,3921	A
Pressão O ₂ [psi]	1 27	11,0008	A
	2 32	7,1583	B ←

FONTE: O autor, 2017.

*Os níveis que não compartilham a letra são significativamente diferentes.

Para o fator “Distância” tem-se que o nível significativamente diferente é o 2 (200 mm) e exerce menor percentual de porosidade por apresentar a menor média, sendo que o nível 1 não ostenta diferença significativa.

No caso do fator “Pré-aquecimento” discorre que os níveis 1 e 2 não apresentem diferença significativa, sendo estes as menores médias para o percentual de porosidade. De fato, isto indica que em termos de estatística não existe diferença significativa entre estes dois parâmetros, desta forma, o intervalo de “Pré-aquecimento”, entre tamb. (temperatura ambiente) e 120 °C faz com que as deposições de revestimento não apresentem diferenças significativas de porosidade.

Os fatores “Fluxo C₂H₂”, “Fluxo N₂” e “Fluxo O₂” apresentaram comportamento semelhante ao “Pré-aquecimento”, sendo que os níveis 1 e 2 exprimem os menores valores médios de porosidade e não apresentam diferença significativa entre si.

A “Taxa de alimentação pó” apresentou um comportamento idêntico ao “Pré-aquecimento”, sendo que os níveis são significativamente diferentes, ficando evidente que o nível 2 é responsável pelo menor percentual de porosidade, ou seja, com taxa de alimentação de 75 g/min é obtido a menor porosidade.

E por fim, a “Pressão O₂” apresentou um comportamento semelhante à “Taxa de alimentação pó”, portanto os níveis são significativamente diferentes, ficando explicito que o nível 2 é responsável pelo menor percentual de porosidade, neste contexto a “Pressão O₂” igual a 32 psi é obtido a menor porosidade.

4.3.1.2 Fração de óxidos

A Tabela 11 apresenta os resultados da fração de óxidos, as quais foram atribuídas valores médios e desvio padrão respectivamente.

TABELA 11 – RESULTADOS DA FRAÇÃO DE ÓXIDOS PARA AS AMOSTRAS (L8 DO TAGUCHI).

Amostras (FS)	Fatores de controle							Óxidos* [%]	
	Distância [mm]	Preaque. [°C]	Fluxo	Fluxo	Fluxo	Taxa Alim. Pó	Pressão O ₂ [psi]	Média	Desvio Padrão
			O ₂ [pes ³ /h]	C ₂ H ₂ [pes ³ /h]	N ₂ [pes ³ /h]	[g/min]			
F1	150	T.amb.	85	50	12	75	32	6,54	1,71
F2	150	T.amb.	85	40	15	90	27	5,33	1,24
F3	150	120	80	50	12	90	27	4,29	1,03
F4	150	120	80	40	15	75	32	3,59	0,65
F5	200	T.amb.	80	50	15	75	27	4,87	0,78
F6	200	T.amb.	80	40	12	90	32	4,96	0,71
F7	200	120	85	50	15	90	32	3,24	0,59
F8	200	120	85	40	12	75	27	4,60	0,67

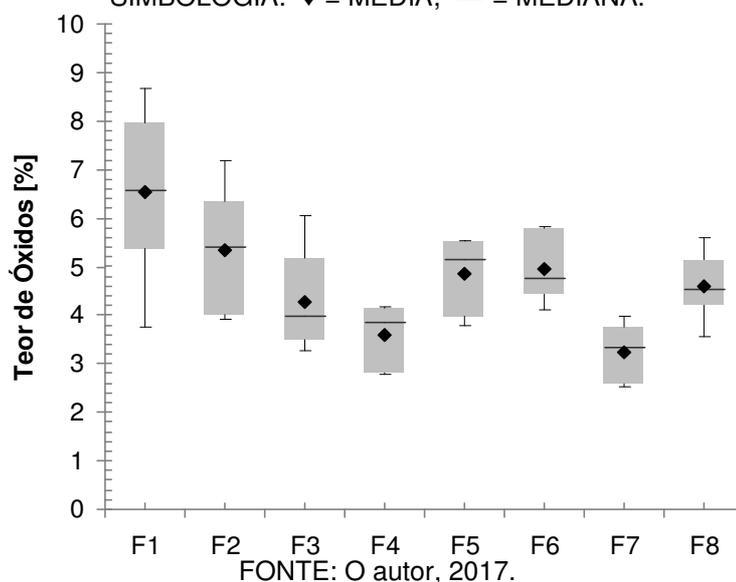
FONTE: O autor (2017)

*Fração de óxidos sobre as imagens geradas por MO, com ampliação de 500x.

Os valores de fração de óxidos (Tabela 11) obtidos em média nos intervalos entre F1 e F8 dos experimentos realizados estão abaixo dos valores citados na literatura.

O Gráfico 13 apresenta os resultados das medições do teor de óxidos, sendo estes na forma de valores médios e respectivo desvio padrão.

GRÁFICO 13 – BOXSPLOT PARA OS RESULTADOS DE TEOR DE ÓXIDOS.
SIMBOLOGIA: '◆' = MÉDIA; '—' = MEDIANA.



FONTE: O autor, 2017.

A partir do Gráfico 13 se observa que o experimento F7 apresenta um menor índice de óxidos, indicando que é possível obter redução de fração de óxido por meio da variação de níveis de fatores no processo de deposição por chama-pó.

A Tabela 12 expõe a análise de variância do teor de óxidos percentual sobre os fatores estudados. Neste sentido, permite tornar conhecido à significância, ou não, de cada fator em relação à fração de óxidos calculado por meio da análise de imagens. Para análise da variância foram utilizadas e testadas as mesmas hipóteses conforme Quadro 8, mas agora no contexto de fração de óxidos.

TABELA 12 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO TEOR DE ÓXIDOS PARA OS FATORES, COM NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA DE 95 %.

Fatores	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrados Médios	Valor-F	Valor-P*
Distância	1	3,2604	3,2604	3,32	0,076
Pré-aquecimento	1	26,7755	26,7755	27,28	0,000
Fluxo O ₂	1	3,0251	3,0251	3,08	0,087
Fluxo C ₂ H ₂	1	0,1508	0,1508	0,15	0,697
Fluxo N ₂	1	8,4420	8,4420	8,60	0,006
Taxa de alimentação	1	2,4076	2,4076	2,45	0,125
Pressão O ₂	1	0,4351	0,4351	0,44	0,509
Erro Residual	40	39,2536	0,9813		
Total	47	83,7499			

FONTE: O autor (2017)

*Sendo o nível de significância de 95%, para valor-P menor que 0,05 é rejeitada a hipótese H_{0x}.

Segundo análise de variância, para todos os fatores o valor-P é menor que 0,05, sendo assim, são rejeitadas as hipóteses H₀₂ e H₀₅. Entretanto, estes fatores são significativos e exercem influência sobre teor de óxidos. Ainda, os fatores “Distância”, “Fluxo O₂”, “Fluxo C₂H₂”, “Taxa de alimentação” e “Pressão O₂” o valor-P é maior que 0,05, então aceitam-se as hipóteses H₀₁, H₀₃, H₀₄, H₀₆ e H₀₇, todavia considera-se que estes fatores não são significativos para a fração de óxidos nos revestimentos.

Para identificar qual fator exerce maior influência, é possível classificar (ranquear) cada fator em função da diferença (delta) entre os valores médios de cada nível, tornando conhecido qual fator é mais influente em função desta maior diferença. A Tabela 13 retrata o ranqueamento para as médias dos efeitos principais de fração de óxidos percentual, ou seja, ranque igual a 1 significa que este é o fator mais influente para o menor percentual do teor de óxidos.

TABELA 13 – RANQUE DE INFLUÊNCIA DOS FATORES PARA A MÉDIA DO TEOR DE ÓXIDOS.

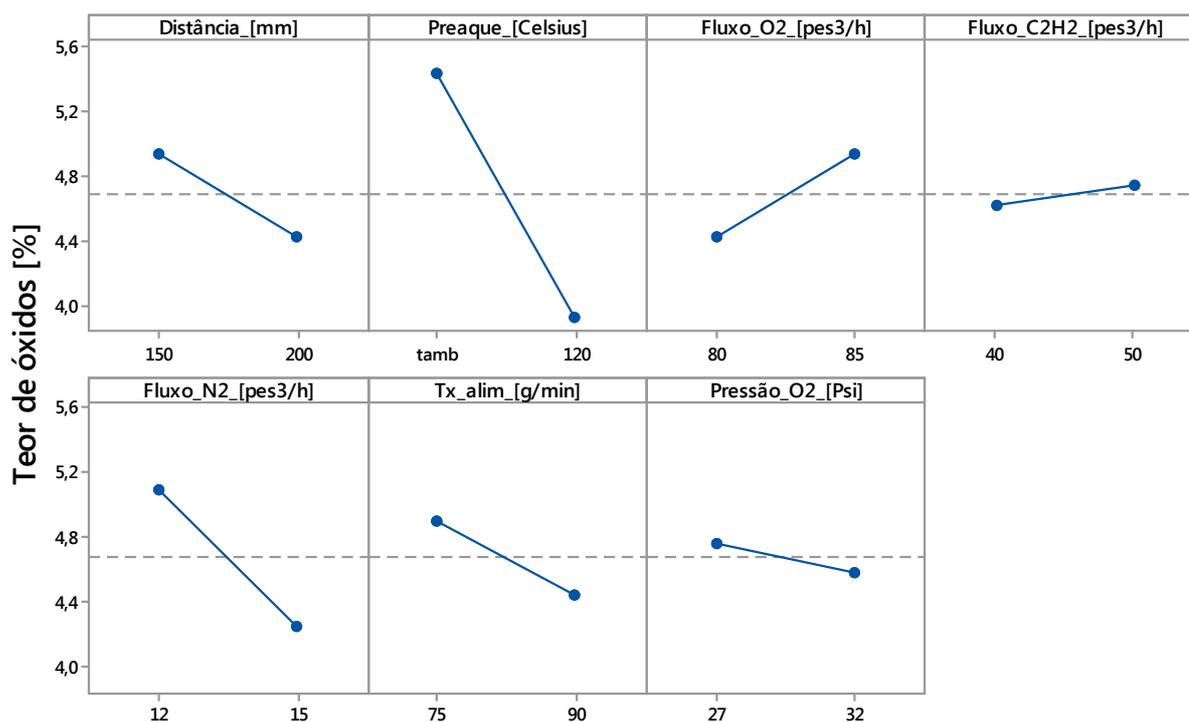
Nível	Distância	Pré-aquecimento	Fluxo O ₂	Fluxo C ₂ H ₂	Fluxo N ₂	Taxa de alimentação	Pressão O ₂
1	4,938	5,424	4,426	4,621	5,097	4,901	4,772
2	4,417	3,930	4,928	4,733	4,258	4,453	4,582
Delta	0,521	1,494	0,502	0,112	0,839	0,448	0,190
Ranque*	3	1	4	7	2	5	6

FONTE: O autor (2017)

*Ranque= 1, significa que este é o fator mais influente para a condição de menor teor de óxidos [%].

Assim, o “Pré-aquecimento” apresentou-se como sendo o fator mais influente para a fração de óxidos, seguido pelo “Fluxo N₂”, “Distância”, “Fluxo O₂”, “Taxa de alimentação”, “Pressão O₂” e por último a “Fluxo C₂H₂”. O Gráfico 14 apresenta a influência de cada parâmetro, ou seja, o efeito de cada nível para cada fator sobre o teor de óxidos nos revestimentos.

GRÁFICO 14 – EFEITOS PRINCIPAIS SOBRE AS MÉDIAS DO TEOR DE ÓXIDOS.



FONTE: O autor, 2017.

O Quadro 10 apresenta os resultados do teste de comparação pelo método de Tukey, considera-se um nível de confiança de 95%. Neste método é permitido determinar a diferença significativa entre os níveis. As setas tornam conhecido o nível que representa os melhores parâmetros para os menores níveis de fração de óxidos.

QUADRO 10 – TESTE DE COMPARAÇÃO PELO MÉTODO DE TUKEY PARA TEOR DE ÓXIDOS.

Fator	Nível	Média [%]	Agrupamento*
Distância [mm]	1 150	4,93792	A
	2 200	4,41667	A ←
Pré-aquecimento [°C]	1 120	5,42417	A
	2 120	3,93042	B ←
Fluxo O ₂ [pes ³ /h]	1 80	4,42625	A ←
	2 85	4,92833	A
Fluxo C ₂ H ₂ [pes ³ /h]	1 40	4,62125	A ←
	2 50	4,73333	A
Fluxo N ₂ [pes ³ /h]	1 12	5,09667	A
	2 15	4,25792	B ←
Taxa de alimentação pó [g/min]	1 75	4,90125	A
	2 90	4,45333	A ←
Pressão O ₂ [psi]	1 27	4,7725	A
	2 32	4,58208	A ←

FONTE: O autor, 2017.

*Os níveis que não compartilham a letra são significativamente diferentes.

No caso do fator “Distância” discorre que os níveis 1 e 2 não apresentem diferença significativa, sendo estes as menores médias para o percentual do teor de óxidos. Isto indica que estatisticamente não existe diferença significativa entre estes dois parâmetros, para tanto, o intervalo de “Distância”, entre 150 e 200 mm faz com que as deposições de revestimento não apresentem diferenças significativas de fração de óxidos.

Para o fator “Pré-aquecimento” tem-se que o nível significativamente diferente é o 1 (120 °C) e exerce menor percentual de teor de óxidos por apresentar a menor média, sendo que o nível 2 não mostra diferença significativa.

O “Fluxo N₂” apresentou um comportamento semelhante ao “Pré-aquecimento”, portanto os níveis são significativamente diferentes, ficando evidente que o nível 2 é responsável pelo menor percentual de teor de óxidos, ou seja, com “Fluxo N₂” de 15 pes³/h é obtido a menor fração de óxidos.

E por fim, os fatores “Fluxo O₂”, “Fluxo C₂H₂”, “Taxa de alimentação pó” e “Pressão O₂” além de não serem fatores significativos, não apresentaram diferenças significativas entre seus níveis.

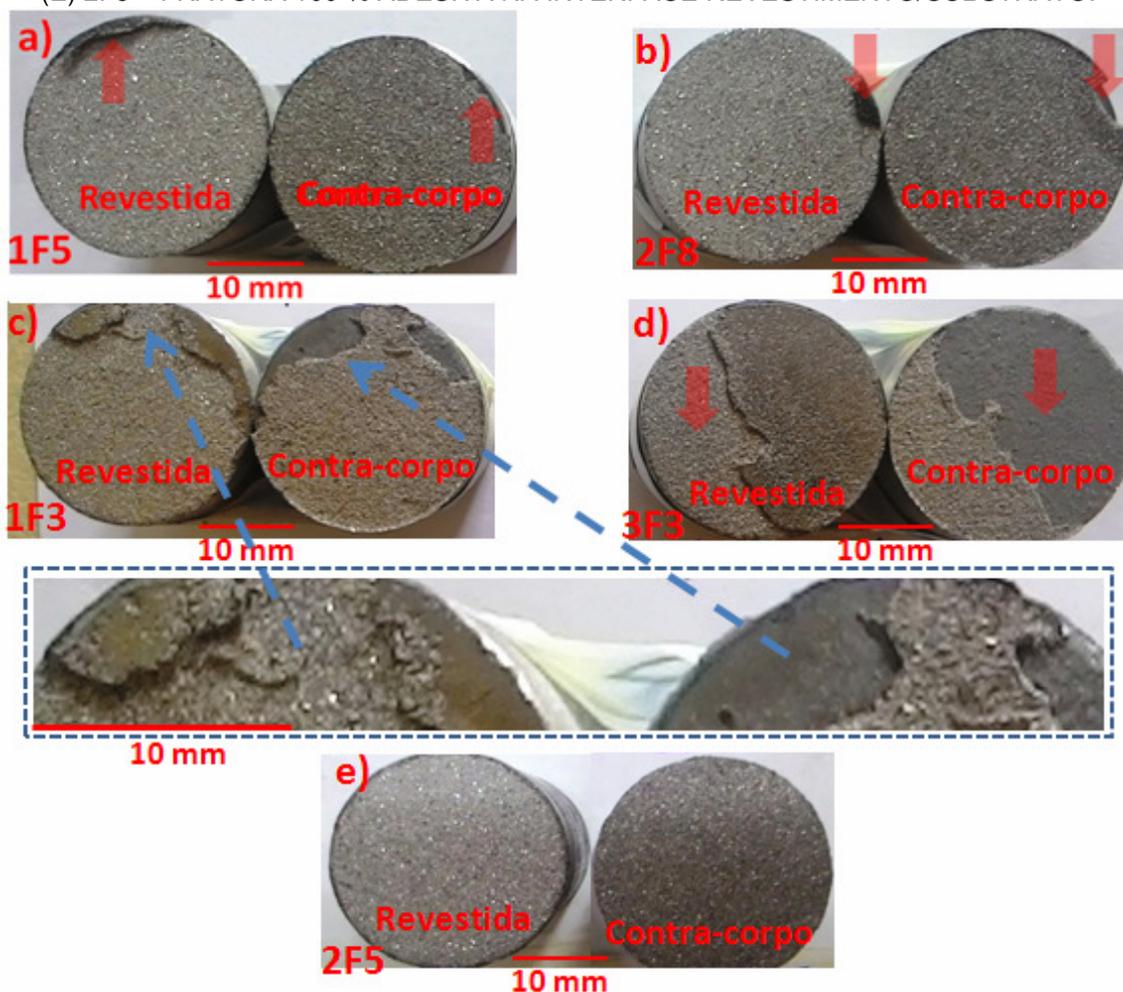
4.4 ANÁLISE DO ENSAIO DE ADERÊNCIA POR TRAÇÃO

O ensaio de aderência dos revestimentos é avaliado em função da carga de ruptura e modo de fratura, bem como o alinhamento das amostras, sistema

dispositivo de fixação no equipamento de tração. Para tanto, qualquer desvio no alinhamento e sistema de fixação pode acusar incorreções de resultados pela aplicação diferenciada da carga dividida pela área da seção transversal na camada depositada (LIMA; TREVISAN, 1999).

Para as amostras 1F5, 2F8 e 1F3, foram observadas a falta de cola devido o experimento não ser alinhado corretamente com o contra-corpo, pois a superfície do revestimento estava irregular (falta de planicidade), conforme são apresentados nas Figuras 31(a)(b)(c). No experimento 3F3 teve fratura 60 % no adesivo, de forma, a ser descaracterizado a resistência efetiva do revestimento (Figura 31(d)). Nos demais casos, houve coerência nos resultados obtidos, ou seja, as fraturas foram 100 % adesiva na interface revestimento/substrato, conforme denota a Figura 31(e).

FIGURA 31 – ANÁLISE DE ENSAIO DE ADERÊNCIA POR TRAÇÃO: (A) 1F5 – FALTA DE COLA; (B) 2F8 – FALTA DE COLA; (C) 1F3 – FALTA DE COLA; (D) 3F3 – FRATURA 60 % NO ADESIVO; (E) 2F5 – FRATURA 100 % ADESIVA NA INTERFACE REVESTIMENTO/SUBSTRATO.



FONTE: O autor, 2017.

A Tabela 14 apresenta os resultados do ensaio de aderência por tração, nas amostras com pré-aquecimento observa-se valores de aderência acima de 16 MPa.

TABELA 14 – RESULTADOS DA ADERÊNCIA POR TRAÇÃO NO ARRANJO L8 TAGUCHI.

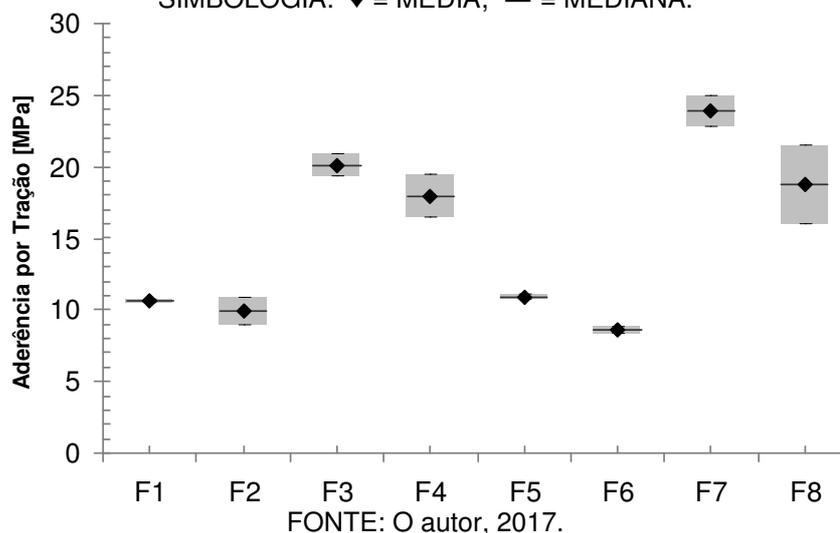
Amostras (FS)	Fatores de controle							Aderência* [MPa]	
	Distância [mm]	Preaque. [°C]	Fluxo			Taxa Alim. Pó [g/min]	Pressão O ₂ [psi]	Média	Desvio Padrão
			O ₂ [pes ³ /h]	C ₂ H ₂ [pes ³ /h]	N ₂ [pes ³ /h]				
F1	150	T.amb.	85	50	12	75	32	11,33	1,16
F2	150	T.amb.	85	40	15	90	27	10,64	1,58
F3	150	120	80	50	12	90	27	19,71	1,01
F4	150	120	80	40	15	75	32	16,15	3,51
F5	200	T.amb.	80	50	15	75	27	11,09	0,35
F6	200	T.amb.	80	40	12	90	32	9,26	1,16
F7	200	120	85	50	15	90	32	22,05	3,41
F8	200	120	85	40	12	75	27	16,40	5,02

FONTE: O autor (2017)

*Medidas de aderência geradas por ensaio de tração em MPa.

O Gráfico 15 apresenta os resultados dos ensaios de aderência, sendo estes na forma de valores médios e respectivo desvio padrão.

GRÁFICO 15 – BOXSPLOT PARA OS RESULTADOS DE ADERÊNCIA POR TRAÇÃO.
SIMBOLOGIA: '◆' = MÉDIA; '—' = MEDIANA.



A norma Militar Standard 2138a (1992), recomenda que a aderência dos revestimentos metálicos para teste individual seja no mínimo de 10,3 MPa ou maior, além disso, a média dos ensaios é compreendida em 13,8 MPa ou maior. Já a

Petrobrás N-2568-b (2011), o valor mínimo de aderência para revestimento de aço inoxidável (próximo do revestimento metálico) é de 10 MPa.

A partir do Gráfico 15 se observa que os experimentos F3, F4, F7 e F8 apresentam as maiores tensões de ruptura, de acordo com a literatura especializada e indicando que é possível obter aumento na tensão de ruptura por meio da variação de níveis de fatores no processo de deposição por chama-pó.

A Tabela 15 apresenta a análise de variância da tensão de aderência por tração sobre os fatores estudados e permite tornar conhecido à significância de cada fator em relação à aderência medida em MPa. Para análise da variância foram utilizadas e testadas as mesmas hipóteses conforme Quadro 8, voltadas para a aderência do revestimento.

TABELA 15 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA ADERÊNCIA POR TRAÇÃO PARA OS FATORES, COM NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA DE 95 %.

Fatores	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrados Médios	Valor-F	Valor-P*
Distância	1	3,276	3,276	1,03	0,340
Pré-aquecimento	1	414,122	414,122	130,29	0,000
Fluxo O ₂	1	8,180	8,180	2,57	0,147
Fluxo C ₂ H ₂	1	26,420	26,420	8,31	0,020
Fluxo N ₂	1	5,153	5,153	1,62	0,239
Taxa de alimentação	1	4,285	4,285	1,35	0,279
Pressão O ₂	1	0,504	0,504	0,16	0,701
Erro Residual	8	25,428	3,179		
Total	15	487,368			

FONTE: O autor (2017)

*Sendo o nível de significância de 95%, para valor-P menor que 0,05 é rejeitada a hipótese H_{0x}.

Segundo análise de variância, as hipóteses H₀₂ e H₀₄ são rejeitadas, pois estes fatores são significativos e exercem influência sobre a aderência do revestimento. Ainda, os fatores “Distância”, “Fluxo O₂”, “Fluxo N₂”, “Taxa de alimentação” e “Pressão O₂” o valor-P é maior que 0,05, então aceitam-se as hipóteses H₀₁, H₀₃, H₀₅, H₀₆ e H₀₇, onde estes fatores não são significativos para a aderência nos revestimentos.

A Tabela 16 apresenta o ranqueamento para as médias dos efeitos principais de aderência, ou seja, o ranque que for 1 exerce maior influência para a maior aderência nos revestimentos.

TABELA 16 – RANQUE DE INFLUÊNCIA DOS FATORES PARA A ADERÊNCIA TRAÇÃO MÉDIA.

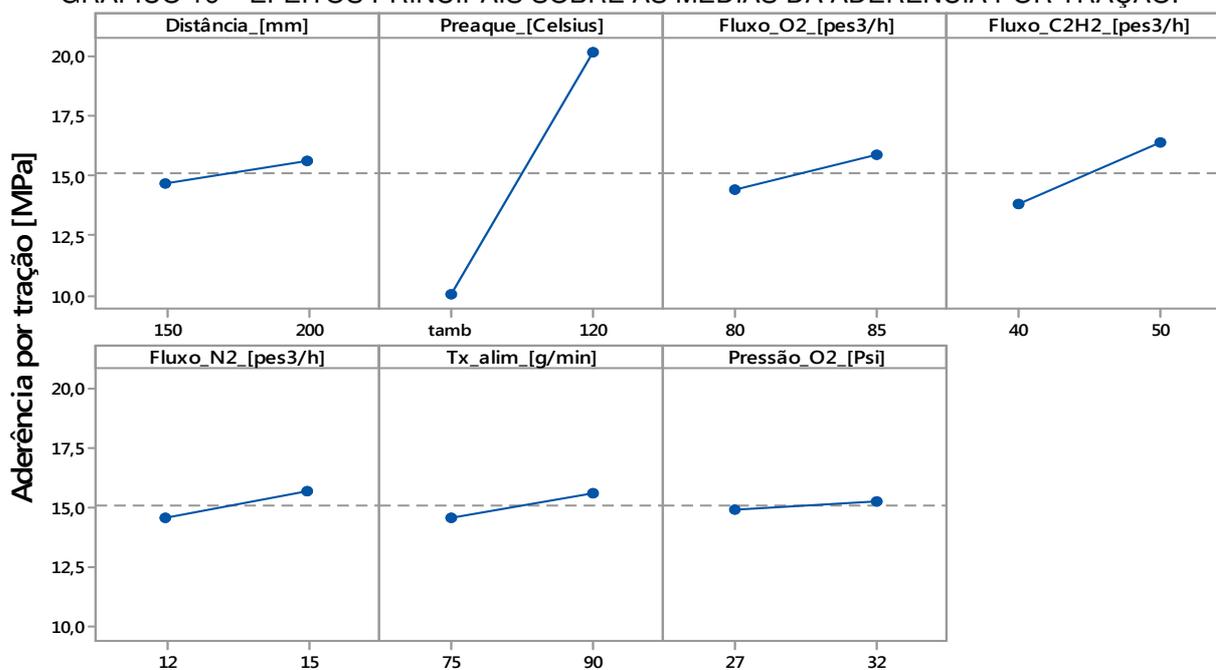
Nível	Distância	Pré-aquecimento	Fluxo O ₂	Fluxo C ₂ H ₂	Fluxo N ₂	Taxa de alimentação	Pressão O ₂
1	14,66	10,02	14,40	13,83	14,55	14,60	14,94
2	15,57	20,20	15,83	16,40	15,68	15,63	15,29
Delta	0,90	10,18	1,43	2,57	1,13	1,04	0,36
Ranque*	6	1	3	2	4	5	7

FONTE: O autor (2017)

*Ranque= 1, significa que este é o fator mais influente para a condição de maior aderência [MPa].

Assim, o “Pré-aquecimento” apresentou-se como sendo o fator mais influente para a aderência, seguido pelo “Fluxo C₂H₂”, “Fluxo O₂”, “Fluxo N₂”, “Taxa de alimentação”, “Distância” e por último a “Pressão O₂”. O Gráfico 16 apresenta a influência de cada parâmetro sobre a aderência por tração nos revestimentos.

GRÁFICO 16 – EFEITOS PRINCIPAIS SOBRE AS MÉDIAS DA ADERÊNCIA POR TRAÇÃO.



FONTE: O autor, 2017.

O Quadro 11 apresenta os resultados do teste de comparação pelo método de Tukey, considera-se um nível de confiança de 95%. Neste método é permitido determinar a diferença significativa entre os níveis. As setas indicam o nível que representa os melhores parâmetros para os maiores níveis de aderência.

QUADRO 11 – MÉTODO DE TUKEY (COMPARAÇÃO) PARA ADERÊNCIA TRAÇÃO.

Fator	Nível	Média [MPa]	Agrupamento*	
Distância [mm]	1 150	14,660	A	←
	2 200	15,565	A	
Pré-aquecimento [°C]	1 120	10,025	A	←
	2 120	20,200	A	
Fluxo O ₂ [pes ³ /h]	1 80	14,398	A	←
	2 85	15,828	A	
Fluxo C ₂ H ₂ [pes ³ /h]	1 40	13,828	A	←
	2 50	16,398	A	
Fluxo N ₂ [pes ³ /h]	1 12	14,545	A	←
	2 15	15,680	A	
Taxa de alimentação pó [g/min]	1 75	14,595	A	←
	2 90	15,630	A	
Pressão O ₂ [psi]	1 27	14,935	A	←
	2 32	15,290	A	

FONTE: O autor, 2017.

*Os níveis que não compartilham a letra são significativamente diferentes.

Para o fator “Pré-aquecimento” tem-se que o nível significativamente diferente é o 1 (120 °C) e exerce maior aderência no revestimento por apresentar a maior média, sendo que o nível 2 não mostra diferença significativa.

O “Fluxo C₂H₂” apresentou um comportamento semelhante ao “Pré-aquecimento”, portanto os níveis são significativamente diferentes, ficando evidente que o nível 1 é responsável pela maior aderência, desta forma o “Fluxo C₂H₂” de 50 pes³/h é obtido a maior aderência no revestimento.

E concluindo a análise de aderência por tração, os fatores “Distância”, “Fluxo O₂”, “Fluxo N₂”, “Taxa de alimentação pó” e “Pressão O₂” além de não serem fatores significativos, não apresentaram diferenças significativas entre seus níveis.

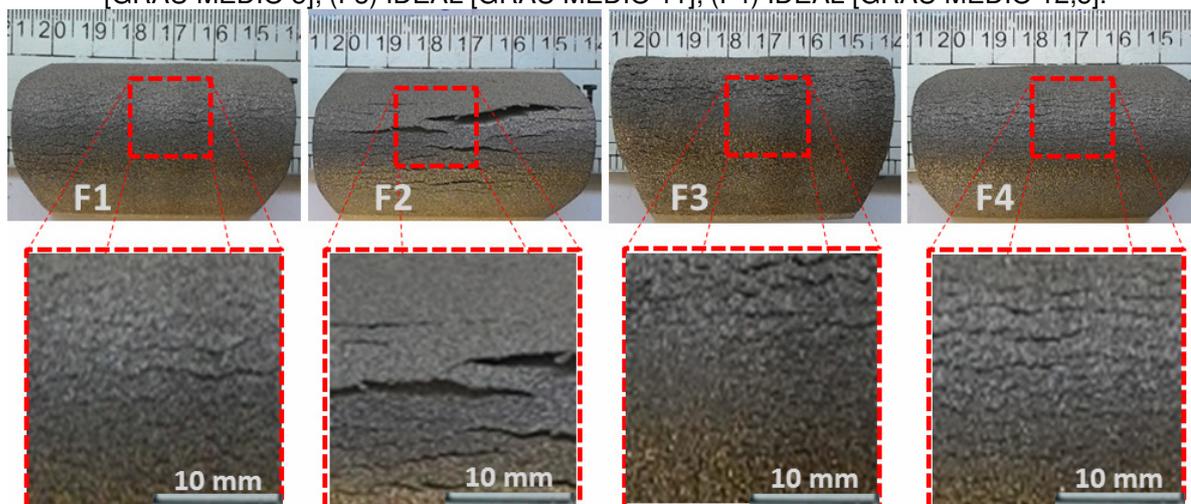
4.5 ANÁLISE DO ENSAIO DE ADERÊNCIA POR DOBRAMENTO

O ensaio de aderência por dobramento é avaliado em função da dobra até 180 graus sobre a amostra que pode apresentar três situações qualitativas como: ideal, marginal e rejeitada (PETROBRAS, 2011). Para a quantificação das condições qualitativas de cada arranjo L8 ortogonal Taguchi de ensaio de dobramento, foram atribuídas conforme definição apresentado no Quadro 4 em metodologias.

Os experimentos F5 e réplicas apresentam trincas e deslocamento nos revestimentos, fato este que os torna com grau de severidade médio 2, isto significa “Rejeitado” de acordo com o Quadro 4. Para as amostras F3, F4 e réplicas denotam

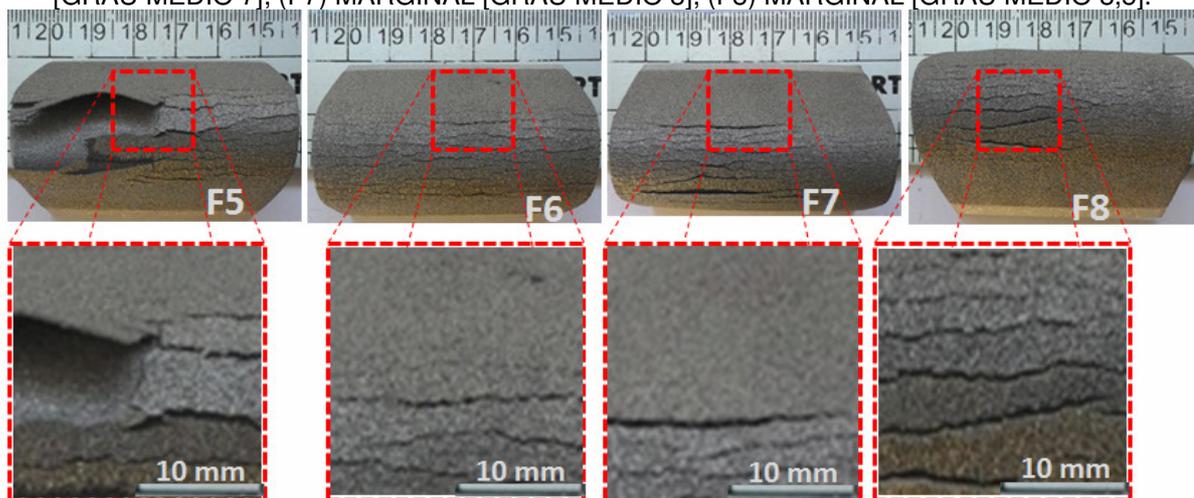
quase a inexistência de trincas, neste sentido se aproximam do grau “Ideal” do Quadro 4, porém foram classificados com valores médios entre 11 e 12,5. Para os demais experimentos, há indícios de trincas sem deslocamento de revestimento, neste caso foram avaliados como grau “Marginal”, com classificação de valores médios entre 5 e 8,5. Os efeitos nas amostras foram analisados a partir das Figuras 32 e 33.

FIGURA 32 – ENSAIO DE DOBRAMENTO: (F1) MARGINAL [GRAU MÉDIO 6,5]; (F2) MARGINAL [GRAU MÉDIO 5]; (F3) IDEAL [GRAU MÉDIO 11]; (F4) IDEAL [GRAU MÉDIO 12,5].



FONTE: O autor, 2017.

FIGURA 33 – ENSAIO DE DOBRAMENTO: (F5) REJEITADO [GRAU MÉDIO 2]; (F6) MARGINAL [GRAU MÉDIO 7]; (F7) MARGINAL [GRAU MÉDIO 8]; (F8) MARGINAL [GRAU MÉDIO 8,5].



FONTE: O autor, 2017.

A Tabela 17 apresenta os resultados do ensaio de aderência por dobramento, de forma que as médias das avaliações corroboram os resultados apresentados acima, conforme critério qualitativo normalizado pela literatura.

TABELA 17 – RESULTADOS DA ADERÊNCIA POR DOBRAMENTO PARA ARRANJO L8 TAGUCHI.

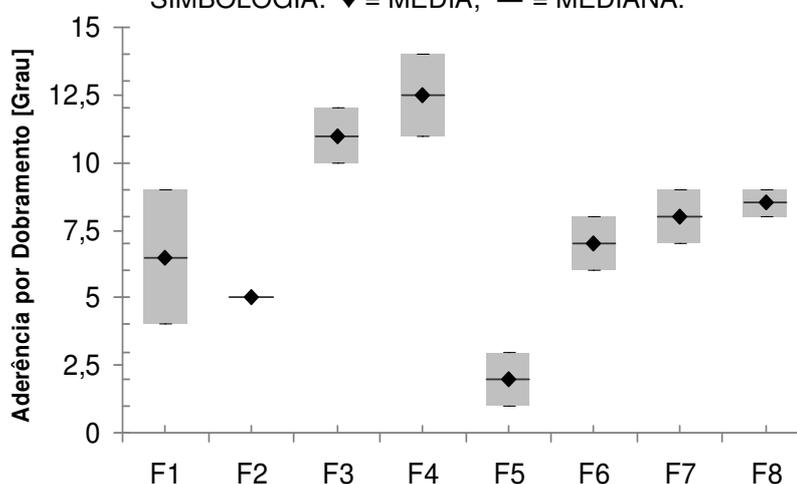
Amostras (FS)	Fatores de controle							Dobramento* [Grau]	
	Distância [mm]	Preaque. [°C]	Fluxo	Fluxo	Fluxo	Taxa Alim. Pó	Pressão O ₂ [psi]	Média	Desvio Padrão
			O ₂ [pes ³ /h]	C ₂ H ₂ [pes ³ /h]	N ₂ [pes ³ /h]	[g/min]			
F1	150	T.amb.	85	50	12	75	32	6,50	3,54
F2	150	T.amb.	85	40	15	90	27	5,00	0,00
F3	150	120	80	50	12	90	27	11,00	1,41
F4	150	120	80	40	15	75	32	12,50	2,12
F5	200	T.amb.	80	50	15	75	27	2,00	1,41
F6	200	T.amb.	80	40	12	90	32	7,00	1,41
F7	200	120	85	50	15	90	32	8,00	1,41
F8	200	120	85	40	12	75	27	8,50	0,71

FONTE: O autor (2017)

*Medidas de dobramento geradas por controle visual e com avaliação por grau de severidade.

O Gráfico 17 apresenta os resultados do ensaio de aderência por dobramento, de forma a observar os valores médios próximos dos valores medianos, e ainda, para os casos de maior dispersão dos dados.

GRÁFICO 17 – BOXSPLOT PARA OS RESULTADOS DE ADERÊNCIA POR DOBRAMENTO.
SIMBOLOGIA: '◆' = MÉDIA; '—' = MEDIANA.



FONTE: O autor, 2017.

A partir do Gráfico 17 se observa que os experimentos F1 e réplicas apresentam as maiores dispersão nos valores, isto de fato denota que as espessuras desses revestimentos estavam acima da norma, onde a Militar Standard 2138a (1992), preconiza uma faixa entre 175 a 250 μm . Ainda, outro ponto importante, nestes experimentos não houve pré-aquecimento. Fato este, que mesmo as amostras F8 e réplicas tendo uma espessura fora do especificado em norma,

contudo apresentaram um desempenho intermediário devido este arranjo L8 ortogonal Taguchi ter o fator pré-aquecimento configurado em nível de 120 °C.

A Tabela 18 apresenta a análise de variância do ensaio de aderência por dobramento sobre os fatores estudados e permite tornar conhecido à significância de cada fator em relação à classificação qualitativa dos revestimentos. Para análise da variância foram utilizadas e testadas as mesmas hipóteses conforme Quadro 8, voltadas para a aderência por dobramento do revestimento.

TABELA 18 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA ADERÊNCIA POR DOBRAMENTO PARA OS FATORES, COM NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA DE 95 %.

Fatores	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrados Médios	Valor-F	Valor-P*
Distância	1	22,563	22,563	7,08	0,029
Pré-aquecimento	1	95,063	95,063	29,82	0,001
Fluxo O ₂	1	5,063	5,063	1,59	0,243
Fluxo C ₂ H ₂	1	7,563	7,563	2,37	0,162
Fluxo N ₂	1	7,563	7,563	2,37	0,162
Taxa de alimentação	1	0,563	0,563	0,18	0,685
Pressão O ₂	1	14,063	14,063	4,41	0,069
Erro Residual	8	25,500	3,188		
Total	15	177,938			

FONTE: O autor (2017)

*Sendo o nível de significância de 95%, para valor-P menor que 0,05 é rejeitada a hipótese H_{0x}.

Na análise de variância, as hipóteses H₀₁ e H₀₂, são rejeitadas, pois estes fatores são significativos e impõem influência sobre a aderência do revestimento por dobramento. Pelo contrário, os fatores “Fluxo O₂”, “Fluxo C₂H₂”, “Fluxo N₂”, “Taxa de alimentação” e “Pressão O₂” o valor-P é maior que 0,05, então aceitam-se as hipóteses H₀₃, H₀₄, H₀₅, H₀₆ e H₀₇, onde estes fatores não são significativos para a aderência nos revestimentos.

A Tabela 19 apresenta o ranqueamento para as médias dos efeitos principais de aderência, neste contexto, o ranque que for 1 exerce maior influência para o maior grau qualitativo de aderência nos revestimentos pelo ensaio de dobramento.

TABELA 19 – RANQUE DE INFLUÊNCIA DOS FATORES PARA A ADERÊNCIA MÉDIA.

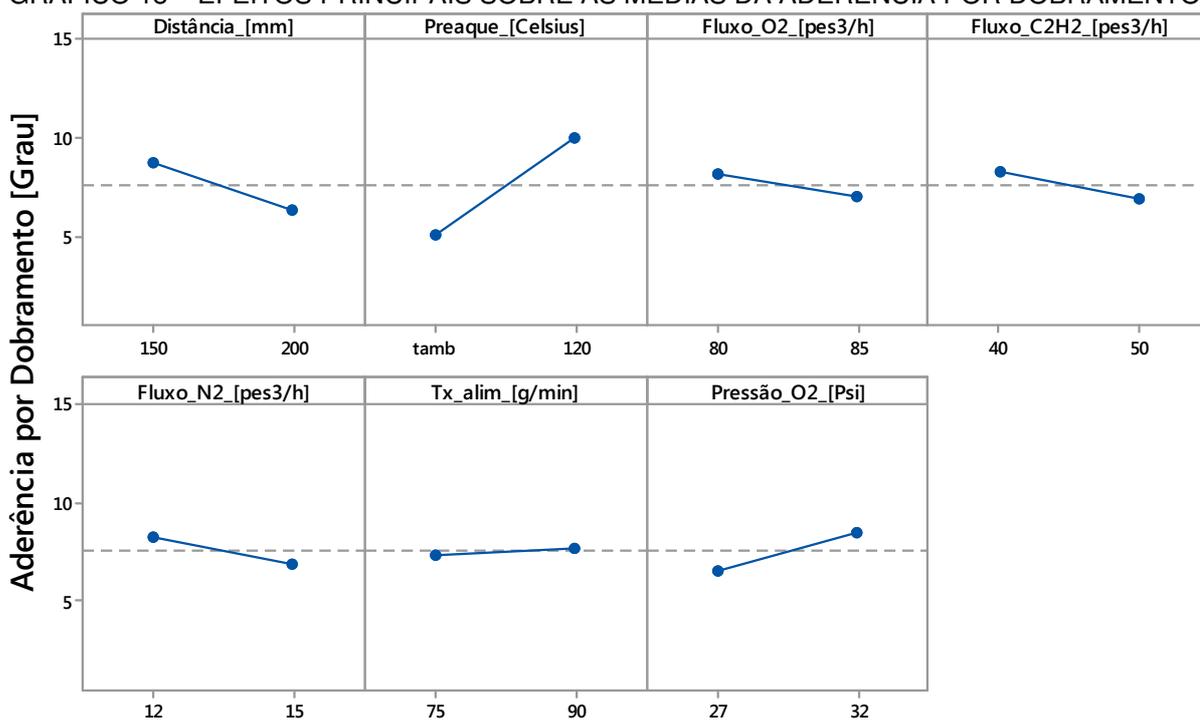
Nível	Distância	Pré-aquecimento	Fluxo O ₂	Fluxo C ₂ H ₂	Fluxo N ₂	Taxa de alimentação	Pressão O ₂
1	8,750	5,125	8,125	8,250	8,250	7,375	6,625
2	6,375	10,000	7,000	6,875	6,875	7,750	8,500
Delta	2,375	4,875	1,125	1,375	1,375	0,375	1,875
Ranque*	2	1	6	4	5	7	3

FONTE: O autor (2017)

*Ranque= 1, significa que este é o fator mais influente para a condição de maior aderência por dobramento [Grau de severidade].

Isto de fato projeta o “Pré-aquecimento” como sendo o fator mais influente para a aderência por dobramento, na seqüência surge a “Distância”, “Pressão O₂”, “Fluxo C₂H₂”, “Fluxo N₂”, “Fluxo O₂” e por último o “Taxa de alimentação”. O Gráfico 18 apresenta a influência de cada parâmetro sobre a aderência por dobramento nos revestimentos.

GRÁFICO 18 – EFEITOS PRINCIPAIS SOBRE AS MÉDIAS DA ADERÊNCIA POR DOBRAMENTO.



FONTE: O autor, 2017.

O Quadro 12 mostra os resultados do teste de comparação pelo método de Tukey, em consideração a um nível de confiança de 95%. Neste método busca-se a diferença significativa entre os níveis. As setas ilustram e indicam o nível que denota os melhores parâmetros para os maiores níveis de aderência por dobramento.

QUADRO 12 – TESTE DE COMPARAÇÃO PELO MÉTODO DE TUKEY PARA ADERÊNCIA.

Fator	Nível	Média [Grade]	Agrupamento*	
Distância [mm]	1	150	A	←
	2	200	B	
Pré-aquecimento [°C]	1	tamb	A	←
	2	120	B	
Fluxo O ₂ [pes ³ /h]	1	80	A	←
	2	85	A	
Fluxo C ₂ H ₂ [pes ³ /h]	1	40	A	←
	2	50	A	
Fluxo N ₂ [pes ³ /h]	1	12	A	←
	2	15	A	
Taxa de alimentação pó [g/min]	1	75	A	←
	2	90	A	
Pressão O ₂ [psi]	1	27	A	←
	2	32	A	

FONTE: O autor, 2017.

*Os níveis que não compartilham a letra são significativamente diferentes.

No caso do fator “Pré-aquecimento” tem-se que o nível significativamente diferente é o 1 (120 °C) e projeta maior aderência no revestimento por apresentar a maior média e o contrário a este, o nível 2 não mostra diferença significativa.

Para o fator “Distância” discorre que o nível 1 (150 mm) exercer significância para a maior aderência no revestimento.

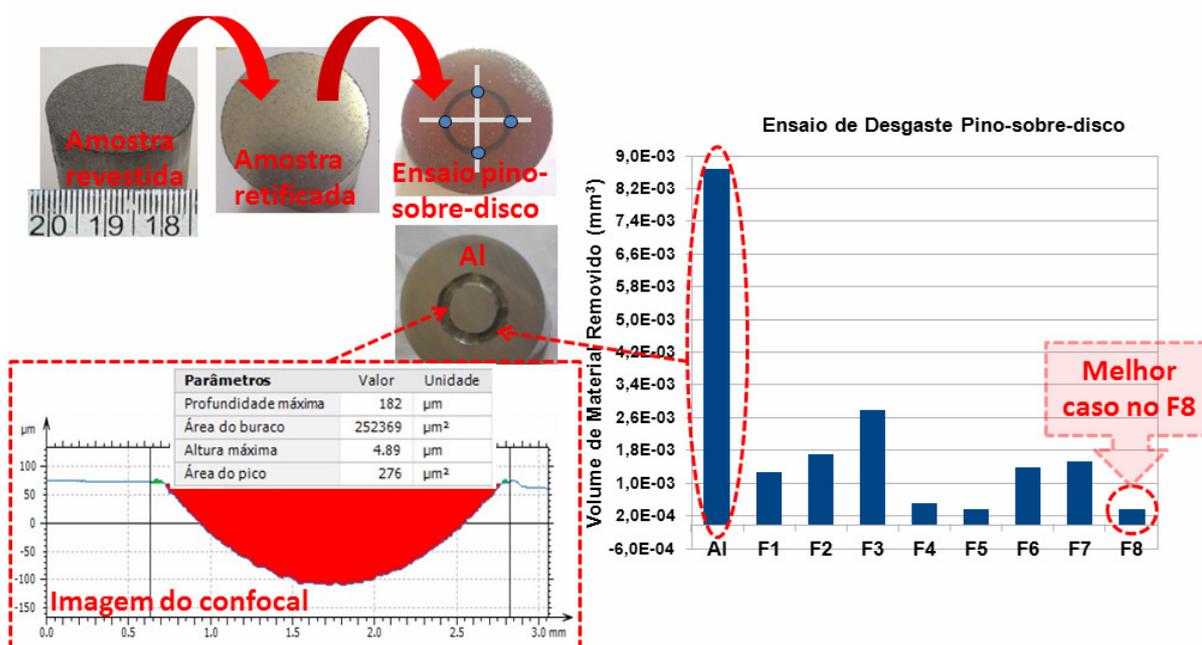
E concluindo a análise de aderência por dobramento, os fatores “Fluxo C₂H₂”, “Fluxo O₂”, “Fluxo N₂”, “Taxa de alimentação pó” e “Pressão O₂” além de não projetar fatores significativos, não apresentaram diferenças significativas entre seus níveis.

4.6 ANÁLISE DO ENSAIO DE DESGASTE

O ensaio de desgaste por deslizamento utilizado neste estudo em questão, foi realizado na configuração pino-sobre-disco. O volume removido de material nos revestimentos stellite 6 aspergidos em Al 6451-T6 pelo processo chama-pó no arranjo L8 Taguchi, foram caracterizados somente no disco (amostras), pois não há um desgaste na esfera do pino tão significante para esta pesquisa.

A Figura 34 detalha todo processo de análise de desgaste por deslizamento adotado nos ensaios.

FIGURA 34 – ANÁLISE DE DESGASTE PINO-SOBRE-DISCO



FONTE: O autor (2017).

O Quadro 13 mostra as profundidades máximas formadas pelo ensaio de desgaste por deslizamento e as espessuras dos revestimentos, de forma a indicar que em nenhum caso as camadas aplicadas por stellite 6 foram perfuradas, o que significa que os revestimentos tiveram um bom desempenho e poderiam ter espessuras mais reduzidas ainda.

QUADRO 13 – RESULTADOS DAS ESPESURAS E PROFUNDIDADE DOS REVESTIMENTOS.

Experimento	Profundidade* Máxima [µm]	Espessura Revestimento [µm]
F1	52,8	500
F2	49,2	380
F3	69,2	380
F4	17,2	280
F5	15,1	382
F6	42,7	290
F7	44,3	290
F8	8,46	350

FONTE: O autor, 2017.

*Profundidade máxima obtida por microscópio confocal em 4 pontos.

A Tabela 20 denota os resultados do ensaio de desgaste, assim como os valores de volume de material removido (VMR) que são apresentados pelas médias das réplicas para cada arranjo L8 ortogonal Taguchi e analisados para as condições estudadas.

TABELA 20 – RESULTADOS DE DESGASTE PARA AS AMOSTRAS (L8 DO TAGUCHI).

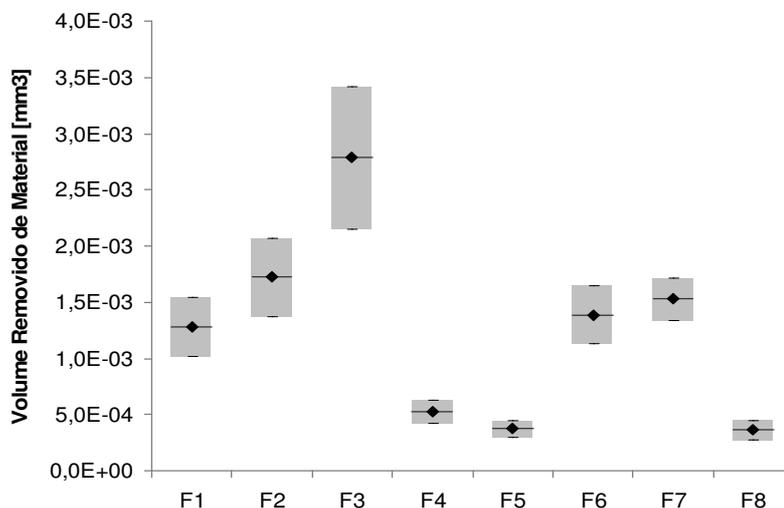
Amostras (FS)	Fatores de controle							Desgaste* [mm ³]	
	Distância [mm]	Preaque. [°C]	Fluxo	Fluxo	Fluxo	Taxa Alim. Pó	Pressão	Média	Desvio Padrão
			O ₂ [pes ³ /h]	C ₂ H ₂ [pes ³ /h]	N ₂ [pes ³ /h]	[g/min]	O ₂ [psi]		
F1	150	T.amb.	85	50	12	75	32	1,28E-03	3,74E-04
F2	150	T.amb.	85	40	15	90	27	1,72E-03	4,88E-04
F3	150	120	80	50	12	90	27	2,78E-03	9,02E-04
F4	150	120	80	40	15	75	32	5,24E-04	1,47E-04
F5	200	T.amb.	80	50	15	75	27	3,72E-04	1,01E-04
F6	200	T.amb.	80	40	12	90	32	1,39E-03	3,66E-04
F7	200	120	85	50	15	90	32	1,53E-03	2,63E-04
F8	200	120	85	40	12	75	27	3,64E-04	1,22E-04

FONTE: O autor (2017)

*Volume de desgaste gerado por microscópio confocal.

O Gráfico 19 apresenta os resultados do ensaio de desgaste, de forma a observar os valores médios próximos dos valores medianos, e ainda, para os casos de maior dispersão dos dados.

GRÁFICO 19 – BOXSPLOT PARA OS RESULTADOS DE DESGASTE.
SIMBOLOGIA: '◆' = MÉDIA; '—' = MEDIANA.



FONTE: O autor, 2017.

A partir do Gráfico 19 se observa que o experimento F3 e réplicas tiveram um grau de dispersão nos valores obtidos, pois as duas médias de perda de volume propiciaram um desvio padrão maior, este fato pode estar ligado a planicidade e perpendicularidade da superfície das amostras durante a preparação. Os experimentos F8, F5 e F4 obtiveram os melhores desempenhos de desgaste por

deslizamento e os demais ensaios quando comparados à liga de Al 6351-T6 também apresentaram efetividade na melhora da resistência ao desgaste.

A Tabela 21 apresenta a análise de variância do ensaio de desgaste sobre os fatores estudados e retrata a significância de cada fator em relação ao (VMR). Para análise da variância foram utilizadas e testadas as mesmas hipóteses conforme Quadro 8, atribuídas ao desgaste (VMR).

TABELA 21 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO VOLUME DE DESGASTE PARA OS FATORES, COM NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA DE 95 %.

Fatores	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrados Médios	Valor-F	Valor-P*
Distância	1	2,0E-06	2,0E-06	9,80	0,014
Pré-aquecimento	1	0,0E+00	0,0E+00	0,27	0,617
Fluxo O ₂	1	0,0E+00	0,0E+00	0,04	0,840
Fluxo C ₂ H ₂	1	1,0E-06	1,0E-06	5,37	0,049
Fluxo N ₂	1	1,0E-06	1,0E-06	3,87	0,085
Taxa de alimentação	1	6,0E-06	6,0E-06	33,05	0,000
Pressão O ₂	1	0,0E+00	0,0E+00	0,38	0,554
Erro Residual	24	1,0E-06	0,0E+00		
Total	31	1,1E-05			

FONTE: O autor (2017)

*Sendo o nível de significância de 95%, para valor-P menor que 0,05 é rejeitada a hipótese H_{0x}.

Na análise de variância, as hipóteses H₀₁, H₀₄ e H₀₆ são rejeitadas, pois estes fatores são significativos e exercem influência sobre o desgaste do revestimento. Pelo contrário, os fatores “Pré-aquecimento”, “Fluxo O₂”, “Fluxo N₂” e “Pressão O₂” o valor-P é maior que 0,05, então aceitam-se as hipóteses H₀₂, H₀₃, H₀₅ e H₀₇, onde estes fatores não são significativos para o desgaste nos revestimentos.

A Tabela 22 apresenta o ranqueamento para as médias dos efeitos principais de desgaste, sendo assim, o ranque que for 1 exerce maior influência para o menor desgaste nos revestimentos.

TABELA 22 – RANQUE DE INFLUÊNCIA DOS FATORES PARA O DESGASTE MÉDIO.

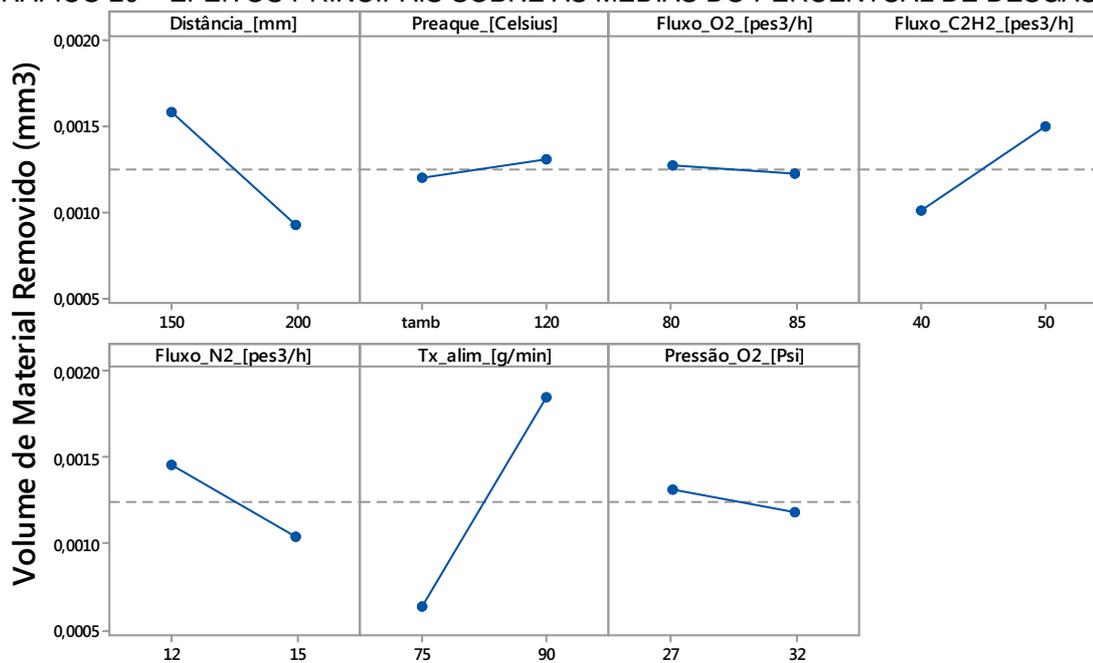
Nível	Distância	Pré-aquecimento	Fluxo O ₂	Fluxo C ₂ H ₂	Fluxo N ₂	Taxa de alimentação	Pressão O ₂
1	1,6E-03	1,2E-03	1,3E-03	1,0E-03	1,5E-03	6,4E-04	1,3E-03
2	9,1E-04	1,3E-03	1,2E-03	1,5E-03	1,0E-03	1,9E-03	1,2E-03
Delta	6,6E-04	1,1E-04	4,4E-05	4,9E-04	4,2E-04	1,2E-03	1,3E-04
Ranque*	2	6	7	3	4	1	5

FONTE: O autor (2017)

*Ranque= 1, significa que este é o fator mais influente para a condição de menor volume removido de material (mm³) em desgaste.

O fator “Taxa de alimentação” é mais influente para o desgaste, na seqüência surge a “Distância”, “Fluxo C₂H₂”, “Fluxo N₂”, “Pressão O₂”, “Pré-aquecimento” e por último o “Fluxo O₂”. O Gráfico 20 apresenta a influência de cada parâmetro sobre o desgaste nos revestimentos.

GRÁFICO 20 – EFEITOS PRINCIPAIS SOBRE AS MÉDIAS DO PERCENTUAL DE DESGASTE.



FONTE: O autor, 2017.

O Quadro 14 mostra os resultados do teste de comparação pelo método de Tukey, com nível de confiança de 95%. As setas ilustram e indicam o nível que apresenta os melhores parâmetros para os menores níveis de desgaste.

QUADRO 14 – TESTE DE COMPARAÇÃO PELO MÉTODO DE TUKEY PARA DESGASTE.

Fator	Nível	Média [mm ³]	Agrupamento*
Distância [mm]	1 150	1,6E-03	A
	2 200	9,1E-04	B ←
Pré-aquecimento [°C]	1 tamb	1,2E-03	A ←
	2 120	1,3E-03	A
Fluxo O ₂ [pes ³ /h]	1 80	1,3E-03	A
	2 85	1,2E-03	A ←
Fluxo C ₂ H ₂ [pes ³ /h]	1 40	1,0E-03	A ←
	2 50	1,5E-03	B
Fluxo N ₂ [pes ³ /h]	1 12	1,5E-03	A
	2 15	1,0E-03	B ←
Taxa de alimentação pó [g/min]	1 75	6,4E-04	A ←
	2 90	1,9E-03	B
Pressão O ₂ [psi]	1 27	1,3E-03	A
	2 32	1,2E-03	A ←

FONTE: O autor, 2017.

*Os níveis que não compartilham a letra são significativamente diferentes.

No caso do fator “Distância” tem-se que o nível significativamente diferente é o 2 (200 mm) e projeta menor desgaste no revestimento por apresentar a menor média e o contrário a este, o nível 1 não mostra diferença significativa.

O “Fluxo C_2H_2 ” apresentou um comportamento semelhante à “Distância”, porém os níveis são significativamente diferentes, ficando evidente que o nível 2 é responsável pelo menor desgaste, desta forma o “Fluxo C_2H_2 ” de 40 pes³/h é obtido o menor desgaste no revestimento.

O fator “Taxa de alimentação” apresentou um comportamento semelhante à “Distância”, porém os níveis são significativamente diferentes, ficando evidente que o nível 2 é responsável pelo menor desgaste, desta forma o “Taxa de alimentação” de 75 pes³/h é obtido o menor desgaste no revestimento.

E concluindo a análise de desgaste por deslizamento, os fatores “Pré-aquecimento”, “Fluxo O_2 ”, “Fluxo N_2 ” e “Pressão O_2 ” além de não projetar fatores significativos, não apresentaram diferenças significativas entre seus níveis.

4.7 RESULTADOS DA ANÁLISE DE PARÂMETROS

A Tabela 23 reúne os melhores resultados e mais significativos níveis para cada propriedade ou resposta analisada. A seqüência adotada das respostas analisadas foi a partir da aderência, desgaste, porosidade, dobramento e teor de óxidos.

A escolha da aderência como fator resposta mais significante se faz necessário pelo fato dos experimentos F1, F2, F5 e F6 se aproximarem muito da tensão de ruptura mínima (10 MPa) preconizado por norma Militar Standard (1992) e Petrobrás (2011). Além disso, os corpos de prova F1, F2, F5 e F6 não têm nível de pré-aquecimento em 120 °C, o que não melhora o efeito molhamento no substrato. Ainda, se adotar o fator “Fluxo C_2H_2 ” igual 40 pes³/h (nível não significante para a aderência e mais significativo para o desgaste), há alteração na razão dos gases de combustão que pode fazer a temperatura da chama diminuir e reduzir a coesão entre partículas, assim prejudicando ainda mais a adesão do revestimento.

A “Taxa de Alimentação” é mais influente para a resposta desgaste, com nível de 90 g/min conduziu os experimentos F2, F3, F6 e F7 a obter muitas partículas não fundidas ou parcialmente fundidas que foram identificadas em várias micrografias por MO com ampliação de 500x. Sucharski (2016) sumariza que

quando a taxa de alimentação controla grande quantidade de pó, significa maior volume de material para dividir a mesma quantidade de calor disponível (menor temperatura de partícula). Com isso, os corpos de provas F2, F3, F6 e F7 obtiveram os piores casos de desgaste por deslizamento, independente dos parâmetros “Fluxo C_2H_2 ” e “Pré-aquecimento”.

TABELA 23 – RESUMO DOS RESULTADOS DA ANÁLISE DE PARÂMETROS.

Propriedade analisada	Distância [mm]	Pré-aquecimento [°C]	Fluxo O_2 [pes ³ /h]	Fluxo C_2H_2 [pes ³ /h]	Fluxo N_2 [pes ³ /h]	Taxa de alimentação [g/min]	Pressão O_2 [psi]
Porosidade	200	Tamb 120	80 85	40 50	12 15	75	32
Teor de óxidos	150 200	120	80 85	40 50	15	75 90	27 32
Aderência	150 200	120	80 85	50	12 15	75 90	27 32
Dobramento	150	120	80 85	40 50	12 15	75 90	27 32
Desgaste	200	Tamb 120	80 85	40	12 15	75	27 32
Nível otimizado para os fatores	200	120	85	50	15	75	32

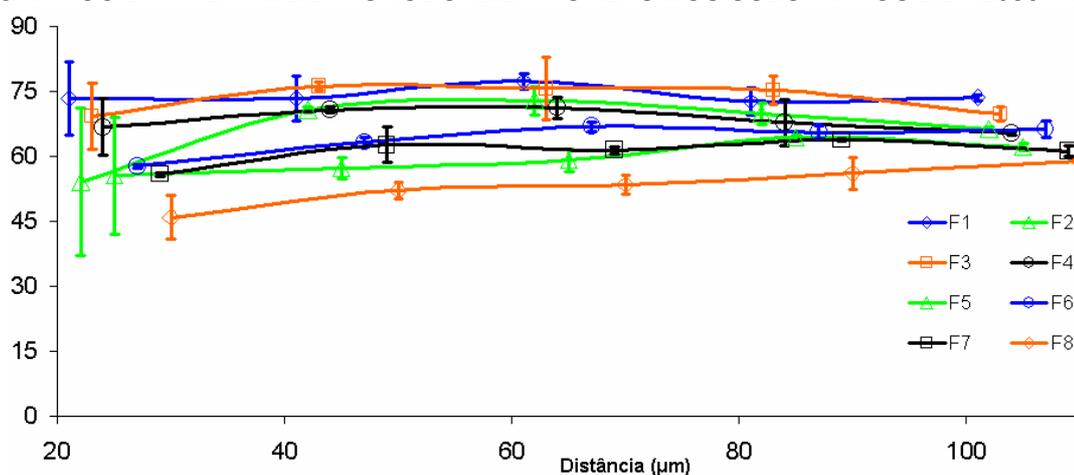
FONTE: O autor (2017)

4.8 ANÁLISE DO ENSAIO DE MICRODUREZA

Os resultados referentes ao perfil de microdureza na secção transversal dos substratos são apresentados no Gráfico 21.

Os experimentos F2, F5 e F8, apresentaram uma variação cerca de 25 % na dureza, para tanto foi possível verificar que o processo chama-pó influenciou na microdureza do substrato. O controle de temperatura durante a aplicação dos revestimentos por pirômetro eletrônico apresentou certa instabilidade nos valores.

GRÁFICO 21 – PERFIL DE MICRODUREZA VICKERS DOS SUBSTRATOS DE AL6351-T6.



FONTE: O autor (2017).

Para o perfil de microdureza na secção transversal dos revestimentos são apresentados no Quadro 15 os resultados das médias e desvio padrão para os experimentos avaliados na matriz L8 Taguchi.

QUADRO 15 – DUREZA DOS REVESTIMENTOS.

Amostras	Média (HV _{0,2})
F1	731,4 ±65,9
F2	716,6 ±30
F3	761 ±55,2
F4	679 ±56,6
F5	668,6 ±41,9
F6	670,8 ±56,4
F7	758,6 ±46,7
F8	694,8 ±29,4

FONTE: O autor (2017).

As microdurezas das camadas depositadas por stellite 6 avaliados no arranjo de matriz L8 Taguchi, se encontram na faixa entre 650 ± 15 e 763 ± 33 HV, citadas na literatura dos revestimentos metálicos a base de cobalto 1256 F e 1248 T (LIRA, 2012).

Porém, no estudo realizado por Macedo *et al.* (2006), a média da microdureza registrada em revestimento stellite 6 foi cerca HV $570,2 \pm 42$ em substrato de alumínio pelo processo HVOF. Além disso, a composição do stellite 6 acusava 4 % (W). Nos experimentos avaliados nesta pesquisa, se obteve uma faixa entre $668,6 \pm 41,9$ e $761 \pm 55,2$ HV, fato este relacionada à justificativa que no revestimento stellite 6 utilizado tem-se na composição 7,5 % (W).

4.9 PARÂMETROS OTIMIZADOS E TESTE DE CONFIRMAÇÃO

Um experimento de confirmação (F9) foi realizado, utilizando a combinação de nível otimizado para os fatores, conforme a Tabela 24.

TABELA 24 – PARÂMETROS UTILIZADOS NO EXPERIMENTO DE CONFIRMAÇÃO.

Propriedade analisada	Distância [mm]	Pré-aquecimento [°C]	Fluxo O ₂ [pes ³ /h]	Fluxo C ₂ H ₂ [pes ³ /h]	Fluxo N ₂ [pes ³ /h]	Taxa de alimentação [g/min]	Pressão O ₂ [psi]
Nível otimizado para os fatores	200	120	85	50	15	75	32

FONTE: O autor (2017)

No ensaio de microdureza não houve nenhuma alteração na dureza do substrato da amostra de confirmação (F9). Ainda, as indentações no revestimento do experimento de confirmação obtiveram uma média de $691,6 \pm 43,49$ HV, ou seja, os valores estão dentro dos resultados obtidos pelos experimentos no arranjo L8 Taguchi.

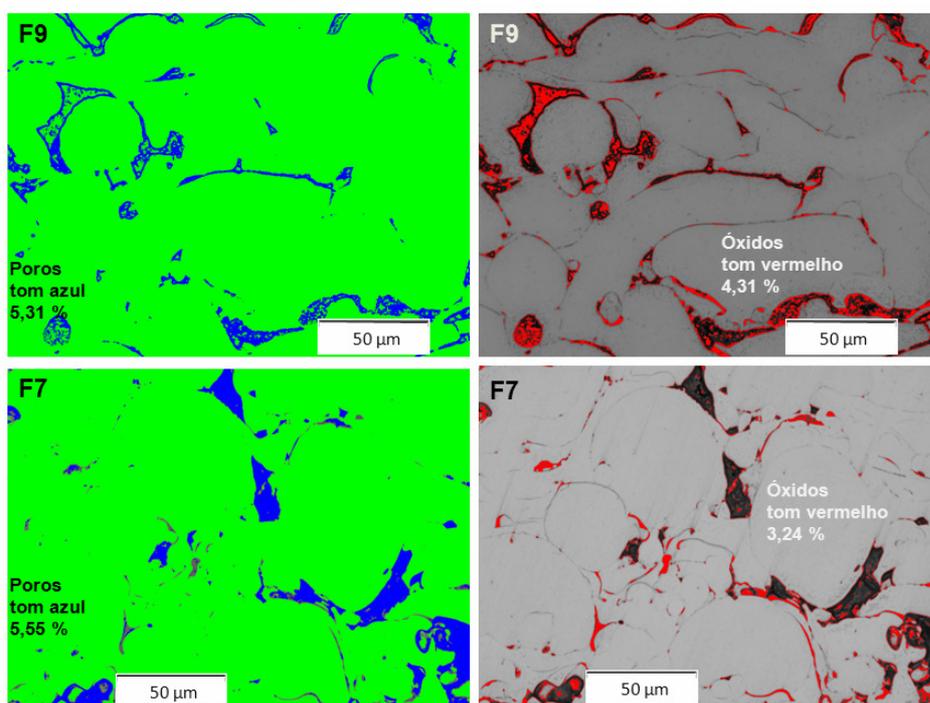
TABELA 25 – RESULTADOS COM O REVESTIMENTO DE CONFIRMAÇÃO (F9).

Propriedade analisada	Média	Desvio Padrão	Melhor Resultado Anterior	Redução Percentual
Porosidade	5,31 %	0,69	5,55 %	5 %
Teor de óxidos	4,31 %	0,88	3,24 %	Não teve
Desgaste	$3,7 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$	$1,2 \times 10^{-4}$	$3,64 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$	Não teve
Aderência	21,89 MPa	2,18	20,02 MPa	9 %
Dobramento	12,5 Grau	2,12	12,5 Grau	Não teve

FONTE: O autor (2017)

Na Tabela 25, percebe-se que no experimento de confirmação (F9) houve melhora de 5 % na porosidade quando comparado ao melhor resultado obtido (F7). Já na resposta teor de óxidos ocorreu um aumento de 24,83 %, ou seja, o experimento de confirmação (F9) obteve 4,31 % contra 3,24 % do melhor resultado (F7). Esta análise de porosidade e teor de óxidos pode ser visualizada na Figura 35 pela técnica *Threshold* do aplicativo Image J®.

FIGURA 35 – ANÁLISE DE POROSIDADE E TEOR DE ÓXIDOS DO EXPERIMENTO (F9).



FONTE: O autor (2017).

Nos ensaios de aderência por tração houve uma redução de 9 % e no ensaio por dobramento não houve alteração na classificação do grau qualitativo da amostra de confirmação (F9) quando comparada com o experimento de melhor resultado (F4).

O resultado da análise do ensaio de desgaste mostrou que o experimento confirmação (F9) obteve uma perda de volume de material em $3,7 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$ contra $3,64 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$ da amostra de melhor resultado (F8). Com isso, praticamente não houve alteração na perda de material, isto de fato valida de forma eficaz toda otimização realizada nos parâmetros de processo chama-pó pela matriz ortogonal L8 Taguchi.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa, fez-se uma avaliação da influência dos parâmetros do processo chama-pó na deposição do revestimento stellite 6 em substrato Al 6351-T6, de forma a buscar as respostas de porosidade, teor de óxidos, aderência tanto por tração como por dobramento e ensaio de desgaste por deslizamento. A utilização da matriz ortogonal L8 Taguchi, provou ser uma ferramenta eficaz na análise da aspensão térmica por chama-pó neste trabalho. Os melhores níveis de cada fator obtidos pela metodologia Taguchi, a qual conduziu a um experimento de confirmação final com boas propriedades no revestimento.

Com base nos resultados experimentais obtidos e análise da literatura é possível contextualizar as seguintes conclusões:

- Para as condições de rugosidades avaliadas no substrato de alumínio, os fatores importantes foram a distância de jateamento, o ângulo da pistola, pressão de jateamento e granulometria da alumina utilizada, a qual garantiu o alcance da faixa de rugosidade planejada na metodologia.
- Quanto à composição química do substrato, é fato que não houve influência significativa nos precipitados Mg_2Si da matrix de alumínio, ou seja, não há transformação de fase devido o processo a chama-pó.
- Quanto ao efeito do teor de óxidos é possível relatar o baixo valor, devido a faixa de granulometria do pó utilizado e a boa otimização no controle dos parâmetros de fluxo dos gases de combustão e gás de arraste.
- Em relação à porcentagem de porosidade, os valores acima de 13 % foram influenciados pelos parâmetros distância (150 mm), taxa de alimentação (90 g/min) e pressão O_2 (27 psi) que aumentaram o nível de partículas parcialmente fundidas no revestimento stellite 6.
- No quesito aderência (tração/dobramento), pode-se concluir que para a obtenção de elevada aderência no processo chama-pó é essencial o pré-aquecimento do substrato. A aderência por tração do revestimento stellite 6 ficou próxima de 20 MPa com pré-aquecimento de 120 °C no substrato e 10 MPa na temperatura ambiente. O modo de falha adesiva contribuiu para 80 % das falhas na interface revestimento e substrato. Já a aderência por dobramento, obteve o melhor resultado no experimento (F4) próximo da condição ideal.

- No caso da microdureza, o revestimento stellite 6 apresentou valor médio de 710 HV, embora a faixa de dureza esteja dentro dos valores de outros trabalhos de aspersão térmica com liga metálica de cobalto, pode-se afirmar conclusivamente que não houve nenhuma relação significativa com os resultados de desgaste. Para o caso de análise do perfil de dureza no substrato de alumínio é possível afirmar que três amostras apresentaram modificação na dureza devido exposição a alta temperatura.
- A resistência ao desgaste por deslizamento do revestimento stellite 6 aspergido por chama-pó mostrou-se ser cerca de 30 vezes (experimento F8) maior do que a resistência do alumínio 6351-T6, este fato está relacionado ao nível de 75 g/min no fator de taxa de alimentação que reduziu o número de partículas parcialmente fundidas nas camadas de stellite 6;

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- controlar a temperatura do substrato com sensores termopares para garantir a integridade do substrato;
- estudar a possibilidade de aplicação dos revestimentos com pré-aquecimento maior que 120 °C e tratamento térmico posterior no revestimento;
- melhorar a perpendicularidade da superfície e planicidade das amostras para ensaio de desgaste;
- polir revestimento, controlar jateamento e limpeza superficial antes de preparar experimentos para ensaio de aderência de tração;
- controlar a espessura no revestimento em função da categoria e/ou tipo de pó metálico.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **G65**: Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus. Estados Unidos: ASTM, 2010.

_____. **G99**: Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus. Estados Unidos: ASTM, 2010.

_____. **C633**: Standard test method for adhesion or cohesion strength of thermal spray coatings. Estados Unidos: ASTM, 2008.

_____. **E3**: Standard guide for preparation of metallographic specimens. Estados Unidos: ASTM, 2012.

_____. **E384**: Standard test method for Knoop and Vickers hardness of materials. Estados Unidos: ASTM, 2012.

_____. **E2109**: Standard test method for determining area percentage porosity of thermal spray coatings. Estados Unidos: ASTM, 2012.

AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS). **Thermal spray**: practice, theory, and application. Estados Unidos: American welding society INC, 1985.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS (ABNT). **NBR 6834**: Alumínio e suas ligas: classificação. Rio de Janeiro, 2000.

_____. **NBR 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002.

BAHBOU, M. F.; NYLEN, P.; WIGREN, J. **Effect of grit blasting and spraying angle on the adhesion strength of a plasma-sprayed coating**. Journal of Thermal Spray Technology, v. 13, n. 4, p. 508-514, 2004.

BHUSHAN, B. Typical test geometries. In: _____. Introduction to tribology. 2. ed. Estados Unidos: John Wiley & Sons, 2013. p. 615-629.

BRAY, J. W. Specific metals and alloys: aluminum mill and engineered wrought products. In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM). v. 2. **Properties and selection**: nonferrous alloys and special-purpose materials. Estados Unidos: ASM Internacional, 1992. p. 118-221.

CASTELETTI, L. C., FERNANDES, F. A. P., TAKEYA, G. S., PICON, C. A., TREMILOSI-FILHO, G. **Avaliação da resistência à corrosão do aço AISI 420 depositado por processos variados de aspersão térmica**. Rem: Revista Escola de Minas, v. 63, p. 87-90, 2010.

CORREA, E. O. Avaliação da resistência ao desgaste de ligas desenvolvidas para solda de revestimento duro para uso sob condições altamente abrasivas. 171 f. **Tese** (Doutorado) - Universidade de São Carlos, São Paulo, 2005.

CROOK, P. Specific metals and alloys: cobalt and cobalt alloys. In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM). v. 2. **Properties and selection**: nonferrous alloys and special-purpose materials. Estados Unidos: ASM Internacional, 1992. p. 1404-1425.

DAVIS, J. R. Principles of friction and Wear: wear. In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM). **Surface engineering**: For corrosion and wear resistance. Estados Unidos: ASM Internacional, 2001. p. 52-86.

DELORO, S. **Stellite 6 alloy**. Estados Unidos: Deloro stellite, 2008. Technical data.

ENGEL, P. A. Wear: Impact wear. In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM). v. 18. **Friction, lubrication, and wear technology**. Estados Unidos: ASM Internacional, 1992. p. 493-512.

EYRE, T. S. **The mechanisms of wear**. Tribology Internacional, UK, v. 11(5), p. 91-96, April, 1978.

GEDDES, B.; LEON, H.; HUANG X. **Superalloys - Alloying and Performance**. ASM Materials Park, p. 3-65, 2010.

HUTCHINGS, M. **Tribology**: friction and wear of engineering materials. Oxford: Butterworth Heinemann, 1992.

IBRAHIM, R. N., LAM, Y. C. L., ISCHENKO, D. D. **Predictions of residual stresses caused by quenching process in aluminium 6351-T6 gas cylinder**. In: Advances in Fracture Research. UK: Pergamon. 1997. p. 2535 - 2542.

KAGA, S., FUJI, K., TAMURA, T., YAMAMOTO, Y., OGAWA, K., ABE, N., TOMIE, M. **Strength of candidate materials for nuclear fusion reactor and their electron beam welded joint at cryogenic temperature**. Welding Research Institute of Osaka University. 1988. Transactions of JWRI, Vol. 17, No. 2.

KAUFMAN, J. G. Applications for Aluminum Alloys and Tempers. In: _____. **Introduction to Aluminum Alloys and tempers**. Estados Unidos: ASM International, 2000. p. 76-152.

KENNAMETAL. **Ligas para revestimentos duros**. Disponível em: <http://www.stellite.com/Portals/0/hardfacing%20alloys-%20portu_gese.pdf>. Acesso em: 15 outubro 2016.

KLARSTROM, D., CROOK, P., WU, J. Metallography and microstructures of nonferrous alloys: metallography and microstructures of cobalt and cobalt alloys. In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM). v. 9. **Metallography and microstructures**. Estados Unidos: ASM Internacional, 2004. p. 1814-1841.

KUMAR, S., GANDOTRA, S., KUMAR, S., NRIPJIT, TRIPATHI, H. **Investigate the effect of additives on mechanical properties during casting de 6351 aluminium**, Web of Conference MATEC 57 03008, 2016, ICAET.

KUMAR, G. N., NARAYANASAMY, R., NATARAJAN, S., BABU, S.P.K., KATAKAM, S., SUBBARAYAN, S. **Dry Sliding Wear Behaviour of Aa 6351-Zrb 2 in Situ Composite at Room Temperature**. vol. 31, 2010.

- KUTZ, M. **Handbook of Materials Selection**. John Wiley & Sons, INC, 2002.
- LIMA, C. R. P. Caracterização de coberturas obtidas por aspersão térmica a plasma. 182 f. **Tese** (Doutorado) - UNICAMP, Campinas, 2001.
- LIMA, C. C., TREVISAN, R. **Aspersão Térmica: Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Artliber, 2 ed. 2007.
- LIMA, C. C., TREVISAN, R. **Ensaio de adesão em revestimentos metal-cerâmicos obtidos por Aspersão Térmica a Plasma**. Ciência & Tecnologia, São Paulo, v. 13, p. 51-62, 1999.
- LIRA, L. P. Avaliação da resistência ao desgaste e à corrosão de revestimentos aspergidos termicamente em liga de alumínio AA 7475. 88 f. **Dissertação** (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- MACEDO, D.T., GOUVEA, C.A.R., CRUVINEL, L.B., NUCCI, R., CASTELETTI, L.C. **Avaliação de revestimentos produzidos por aspersão térmica em substrato da liga de alumínio 7075-T3**. 17° CBECiMat, 2006, Foz do Iguaçu, Paraná.
- MELLALI, M., GRIMAUD, A., LEGER, A. C., FAUCHAIS, P., LU, J. Alumina grit blasting parameters for surface preparation in the plasma spraying operation. **Journal of Thermal Spray Technology**, v. 6, n. 2, p. 217-227, 1997.
- METCO, O. **An introduction to thermal spray**. 6. ed. Switzerland: Oerlikon Metco, 2016a, 24 p.
- METCO, O. **Cobalt chromium (nickel) tungsten carbon alloy powders**. Switzerland: Oerlikon Metco, 2016b, 6 p. Material Product Data Sheet.
- METCO, S. Type 6P-II thermospray gun: instructions. Estados Unidos, 2001, 55 p.
- WEG, T. Manual de preparação de superfície. Guaramirim,
- MILITAR STANDARD, **2138a**: metal sprayed coatings for corrosion protection aboard naval ship. Washington, DC, USA, 1992, 33p.
- MONDOLFO, L.F. **Aluminum Alloys: Structure and Properties**, Butterworths, 1976.
- _____. **Metallography of Aluminum Alloys**, John Wiley & Sons, 1943, p.120.
- NASCIMENTO, S. M., MARIANO, C., PAREDES, R. S. C. **Caracterização das propriedades da mistura de FeAl depositado como revestimento por aspersão térmica a chama**. In: 4º PDPETRO, Campinas, SP. 2007.
- PAREDES, R. S. C. Estudo de revestimentos de alumínio depositados por três processos de aspersão térmica para a proteção do aço contra corrosão marinha. 266 f. **Tese** (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.
- PAREDES, R. S. C., D'OLIVEIRA, A. S. C. M. **Efeito da rugosidade e do preaquecimento do substrato na morfologia e aderência de revestimentos de alumínio depositados por aspersão térmica**, Curitiba, PR, abril 2001.

PAWLOWSKI, L. **The science and engineering of thermal spray coatings**. 2nd ed. Southern Gate: John Wiley Ltd, 2008.

PETROBRAS. **N-2568-b**: Revestimentos metálicos por aspersão térmica - referências - elaboração. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **N-9**: tratamento de superfícies de aço com jato abrasivo e Hidrojateamento - referências - elaboração. Rio de Janeiro, 2013.

PRASAD, Y. V. R. K., RAO, K. P. **Hot Working Guide**: A Compendium of Processing Maps, Second Edition, 2015

SABER, J. V., SUCHARSKI, G. B., PAREDES, R. S. C. **A influência do material de substrato na aderência de um revestimento de liga Fe-Cr-Mn-Si-B depositada por processo de HVOF**. Curitiba: UFPR, 2017.

SABESP - COMPANHIA SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO SÃO PAULO. **NTS085**: Preparo de superfícies metálicas para pintura. São Paulo, 2001, 20 p.

SCHEID, A. Estudo dos mecanismos de degradação para o desenvolvimento de ligas para componentes de pote de galvanização. 135 f. **Tese** (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

SILVA, F. U. **Abrasivos**: escória de cobre. [Editorial]. Revista JP Jateamento & Pintura, v.1, n.3, p. 11-13, jul./ago., 2013.

SILVA, V. C., PAREDES, R. S. C. Efeito do pré-aquecimento e de único e múltiplos passes no grau de porosidade, oxidação e microdureza de um revestimento de aço inoxidável duplex depositado por aspersão térmica chama arame. **Soldag. Insp.**, São Paulo, v. 21, n. 4, p. 529-541, 2016.

SIMUNOVIC, K. **Thermal spraying welding engineering and technology**: thermal spraying. London: Ed. Eolss Publishers, 2010.

SHABEL, B. S., GRANGER, D. A., TRUCKNER, W. G. Friction, lubrication, and wear technology: friction and wear of aluminum-silicon alloys. In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM). v. 18. **Friction, lubrication, and wear technology**. Estados Unidos: ASM Internacional, 1992. p. 1599-1617.

SOUZA, M. M. Avaliação do comportamento tribológico e das propriedades de superfície do aço 4140 revestido pelos processos HVOF e cromo duro eletrodepositado. 182 f. **Dissertação** - Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2014.

SUCHARSKI, B. G. Estudo da erosão por cavitação sobre diferentes morfologias de revestimentos de FeMnCrSiB aplicados por aspersão térmica chama FS e HVOF com tratamento de shot peening. 148 f. **Tese** (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

SOMUNKIRAN, I., NURSOY, M., ÇELIK, H. Effect of Cr content on microstructure and abrasive wear behaviour of Co-based alloys. Powder Metallurgy, Elazig, v. 54, n. 3, p. 209-213, 2011.

RAMNATH, V., ELANCHEZHIAN, C., ANNAMALAI, R. M., ARAVIND, S., ATREYA, T. S. A., VIGNESH, V., SUBRAMANIAN, C. **Aluminium metal matrix composites - a review**, v.38, 2014.

RODRIGUEZ, R. M. H. P. Formação de óxidos nos revestimentos de alumínio depositados por aspersão térmica. 134 f. **Tese** (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

TUCKER, R. C. Jr. Vacuum and controlled-atmosphere coating and surface modification processes: thermal spray coatings. In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM). v. 5. **Surface engineering**. Estados Unidos: ASM Internacional, 1994. p. 1446-1471.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA (UFU). Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD). **Boletins Técnicos**. Uberlândia, 2017 em: <http://www.lta.d.mecanica.ufu.br/sites/ltad.mecanica.ufu.br/files/anexos/ensaios_de_desgaste_abrasivo.pdf>. Acesso: 6 dez. 2017.

WARMUZEK, M. Metallography and microstructures of nonferrous: Metallographic Techniques for Aluminum and Its Alloys. In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM). v. 9. **Metallography and microstructures**. Estados Unidos: ASM Internacional, 2004. p. 1688-1787.

WU, J.B.C., REDMAN, J.E. Hardfacing with cobalt and nickel alloys. **Welding Journal**, v.73, n.9, p. 63-68, Sept.1994.

ZUM GAHR, K. H. **Microstructure and Wear of Materials**. Amsterdam: Elsevier Science, 1987.

GLOSSÁRIO

Splat – Significa esparramar, espirrar, salpicar.

Panqueca – Significado de partículas aspergidas deformadas.

Salpico – Significa respingar.

HC – Significado da estrutura cristalina de metais tipo hexagonal.

CFC – Significado da estrutura cristalina de metais tipo cúbica de face centrada.

AU4G – Significa uma liga de alumínio comercial com base $AlCu_4MgSi$.

T6 – Significa solubilização e endurecimento por envelhecimento artificial.

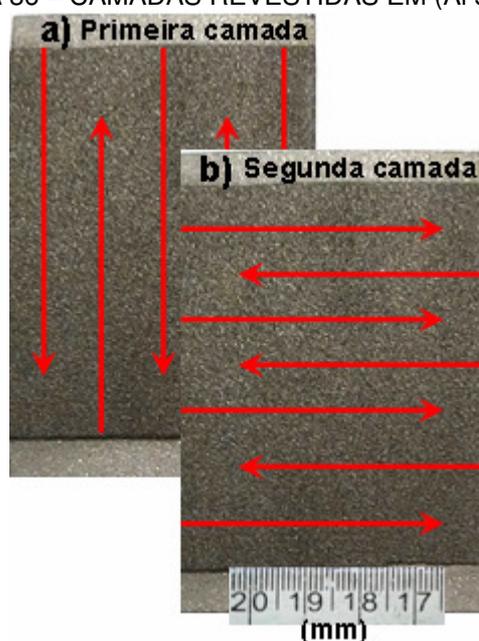
SF6 – Significa liga de cobalto comercialmente stellite 6.

Tamb – Significa temperatura ambiente

APÊNDICE A – APLICAÇÃO DAS CAMADAS DE REVESTIMENTOS

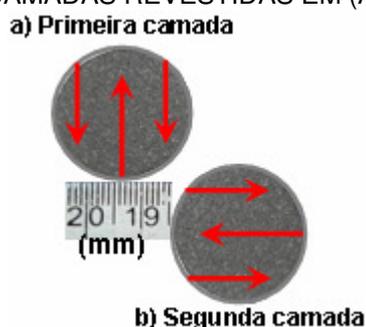
Segundo a norma Petrobrás N-2568-b (2011), as camadas de revestimentos devem ser cruzadas, desta forma os passes aspergidos dentro do possível são aplicados no sentido pés/cabeça/pés e esquerda/direita/esquerda. O controle da espessura fina dos passes garante a aderência e coesão entre camadas, ou seja, proporciona um revestimento uniforme e homogêneo. A Figura 36(a)(b) esboça o método de aplicação do revestimento em experimentos de AI 50 x 75 mm e a Figura 37(a)(b) caracteriza a formação das camadas em amostras com diâmetro 25,4 mm e altura de 35 mm.

FIGURA 36 – CAMADAS REVESTIDAS EM (AI 50 X 75 mm).



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 37 – CAMADAS REVESTIDAS EM (AI Φ 25,4 X 35 mm).

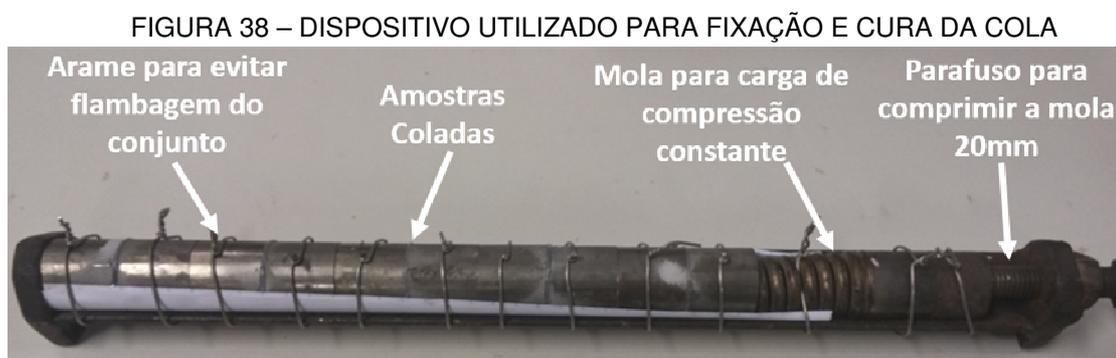


FONTE: O autor (2017).

APÊNDICE B – TESTE PRELIMINAR DE ADERÊNCIA

Para avaliar a aderência dos experimentos revestidos pelo processo de aspersão térmica, a norma ASTM C633 (2008) estabelece os procedimentos de ensaio para análise quantitativa de adesão do revestimento ao substrato Al.

Os experimentos revestidos são colados a outros da mesma dimensão, porém não revestidos. Os contra-corpos foram jateados com óxido de alumínio de 36 mesh (obtidos $R_y = 36-39 \mu\text{m}$ e $R_a = 5-7 \mu\text{m}$) e o adesivo epóxi araldite profissional foi utilizado para colar as amostras. A cura do adesivo ficou em temperatura ambiente por 24 h e utilizou o dispositivo apresentado na Figura 38 para fixar quatro conjuntos por vez.



FONTE: Adaptado de Saber, Sucharski e Paredes (2017).

As amostras com diâmetro de 25,4 mm e profundidade de 35 mm foram fixadas por um sistema de juntas universais (Figura 39), de forma a garantir o alinhamento necessário para o ensaio de aderência auxiliado pela máquina de tração.

FIGURA 39 – SISTEMA DE FIXAÇÃO DAS AMOSTRAS.

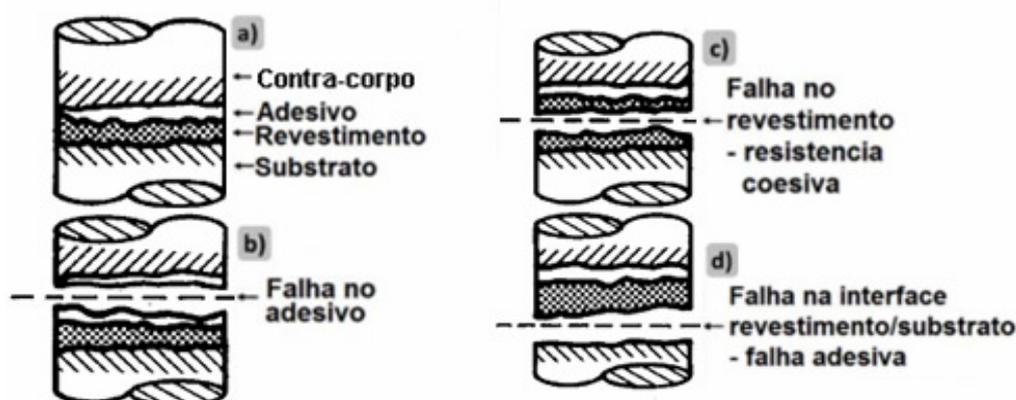


FONTE: O autor (2017).

A Figura 40(a) detalha os corpos de prova montados (revestido e contra-corpo) antes do ensaio de aderência. A análise de ruptura classifica o tipo de falha que os materiais revestidos podem apresentar. Segundo AWS (1985), os modos de falha do revestimento podem ser identificados conforme as possibilidades a seguir:

- falha adesiva → quando a ruptura do corpo ocorre na interface revestimento/substrato (Figura 40(d));
- falha coesiva → se manifesta entre as camadas (lamelas) do revestimento (Figura 40(c));
- falha no adesivo → surge da ruptura na interface com o substrato sem revestimento, de forma, a apresentar a adesão e coesão acima do limite máximo do adesivo (Figura 40(b)).

FIGURA 40 – MODOS DE FALHA DO REVESTIMENTO (ADERÊNCIA)



FONTE: Adaptado AWS (1985).

Os experimentos foram submetidos a tração da máquina universal, sendo um avanço de 0,013 mm/s até sua ruptura, conforme a norma ASTM C633 (2008). Quando atingida esta ruptura, foram registrados os valores da carga para análise posterior. Os parâmetros chama-pó adotados para os testes preliminares são apresentados na Tabela 27 e os resultados dos ensaios estão na Tabela 26.

TABELA 26 – ANÁLISE DE TENSÃO DE ADERÊNCIA DOS EXPERIMENTOS.

Amostra e contra-corpo	Número Passes	Espessura (µm)	Tensão (MPa)	Tipo de Falha
Al (não revestido) – Al	-	-	37,7	no adesivo
Aço (não revestido) – Aço	-	-	37,39	no adesivo
Al (revestido) – Al	2	393	12,05	adesiva
Al (revestido) – Aço	2	380	12,05	adesiva

FONTE: O autor (2017).

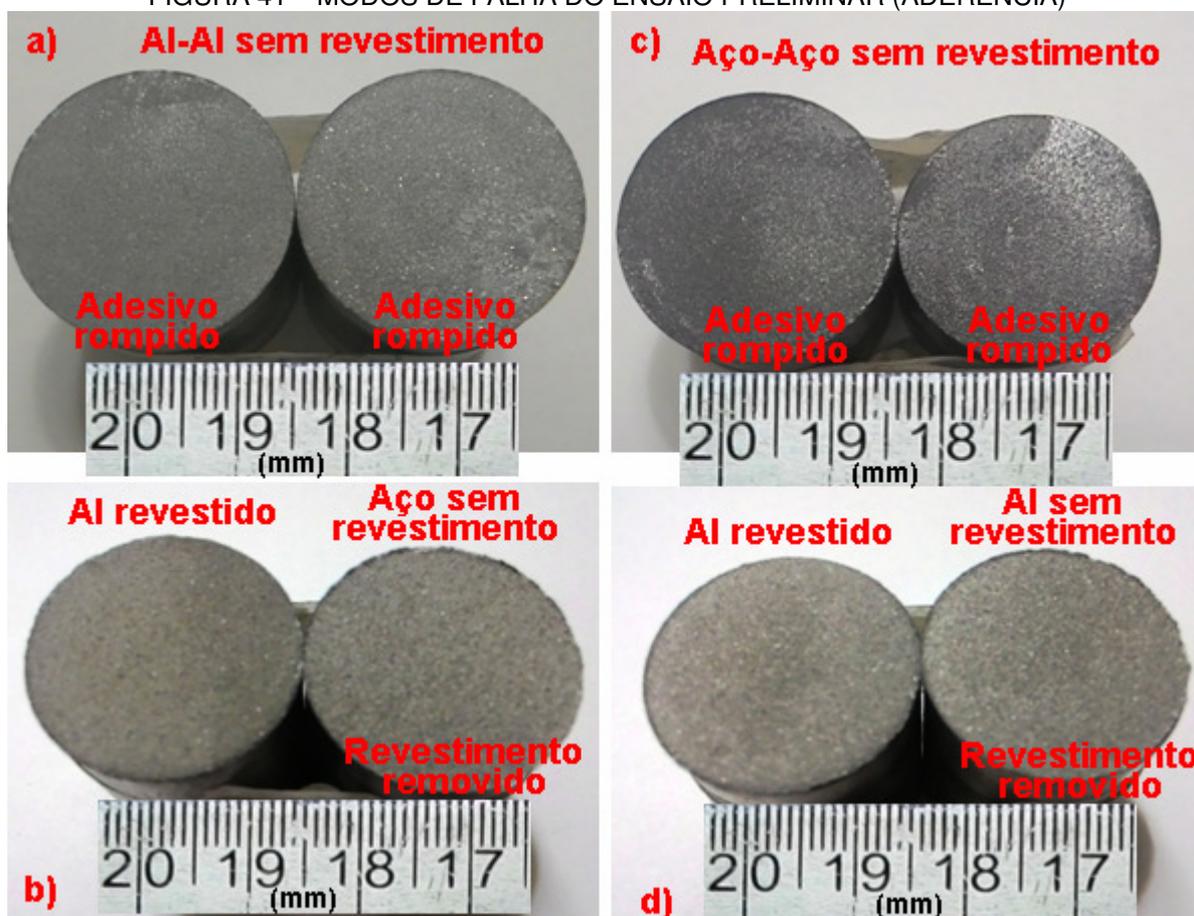
TABELA 27 – PARÂMETROS DE TESTES PRELIMINARES DE ADESÃO.

Parâmetros	Valores
Distância	150 mm
Pré-aquecimento	Temp. amb.
Fluxo O ₂	85 pes ³ /h
Fluxo C ₂ H ₂	50 pes ³ /h
Fluxo N ₂	12 pes ³ /h
Taxa alimentação do pó	75 g/min
Pressão O ₂	32 psi
Liga Stellite 6	-106 +20 µm

FONTE: O autor (2017).

As amostras Al-Al e Aço-Aço, ambos sem revestimentos, apresentaram um limite máximo no adesivo após o rompimento de aproximadamente 37 MPa, com estes dados é possível verificar que entre Al e Aço (contra-corpo) não existe diferença na tensão de aderência (Figura 41(a)(c)). Os experimentos Al revestido-Al e Al revestido-Aço, demonstraram uma falha 100 % adesiva na interface revestimento/substrato e novamente foi comprovado que entre contra-corpos de alumínio e aço não existe diferença na tensão de ruptura (Figura 41(b)(d)).

FIGURA 41 – MODOS DE FALHA DO ENSAIO PRELIMINAR (ADERÊNCIA)



FONTE: O autor (2017).

Segundo a norma Petrobrás N-2568-b (2011), a medição de espessura e adesão do corpo de prova deve ser aspergido numa de suas faces, com aplicação de revestimento entre 300 e 400 μm de modo a evitar a penetração de adesivo até o substrato no ensaio de aderência. Os valores de tensão de aderência obtidos na Tabela 26 para o conjunto stellite 6/alumínio foram próximo de 12 MPa, desta forma se aproximam dos valores mínimos para chama-pó, o revestimento de aço inoxidável tem um valor de 10 MPa, conforme Tabela 28.

TABELA 28 – VALORES DE ADESÃO PARA ASPERSÃO TÉRMICA.

Material aspergido	Aspersão a chama Valor mínimo
Alumínio	7 MPa
Ligas de zinco (85Zn 15Al)	7 MPa
Zinco	5 MPa
Aços Inoxidáveis	10 MPa

FONTE: Adaptado de Petrobrás N-2568-b (2011).

ANEXO A – CERTIFICADO MATERIAL STELLITE 6

Page 1 of 1



Deloro Stellite
1201 Eisenhower Drive N
Goshen, IN 46526 USA
Tel: 574-534-2585
Fax: 574-534-3417
www.Stellite.com

Certified Material Test Report

Certification Date: 04/30/2012
Certification No.: 120427066
Sampling Date: 04/27/2012

Bill To: COMERSUL IMP. EXP. LTDA
RUA PADRE VENACIO DE RESENDE
131 CASA VERDE
SAO PAULO, SP CEP02522-020
BRAZIL

Ship To: COMERSUL IMP EXP LTDA
RUA PADRE VENACIO DE RESENDE
131 CASA VERDE
SAO PAULO, SP CEP02522-020
BRAZIL

Product Code: 513706S010
Alloy No.: 1370
Heat/Lot No.: 5120437-1
Stellite Order No.: 02041012-03
Customer PO No.: 884/12-A

Product Description: Stellite SF6
Customer Spec: SCD-KX
Quantity Ordered: 75 kg (165 lbs)
Quantity Shipped: 75 kg (165 lbs)
Customer ID No.: 900337

Chemical Analysis		
Element	Results	Units
ASTM E1019-08 by Combustion		
Carbon	0.77	%
Sulfur	0.003	%
Analytical Calculation		
TAO_Contents	<0.1	%
ISO 14707:2000 - GD-OES		
B	1.8	%
Cr	19.2	%
Cu	0.5	%
Fe	2.4	%
Mn	0.4	%
Mo	0.1	%
Ni	13.7	%
P	0.013	%
Si	2.6	%
W	7.3	%
Analytical Calculation		
Material Balance	Co	

Sieve Analysis		
Sieve Size	Results	Units
120 mesh / 125 µm	0.0	%
140 mesh / 106 µm	0.1	%
200 mesh / 75 µm	24.5	%
230 mesh / 63 µm	15.9	%
270 mesh / 53 µm	14.7	%
325 mesh / 45 µm	13.1	%
400 mesh / 38 µm	12.7	%
Pan	18.9	%

Physical Properties		
Parameter	Results	Units
Apparent Density	4.8	g/cm ³
Flow Rate	14	sec/50g
Hardness test	47	HRC

Sub-Sieve Analysis		
Particle Size, µm	Results	Units
-20	0.9	% vol

Signed: *Brad Belcher*
Bradley S. Belcher, Acting Quality Manager

Reference: Stellite

Disclosure: All laboratory testing contained within this report has been performed within ASTM standards (B212, B213, B214, B215, E11, B822, E29, and E1019) or other commercially recognized standards and are traceable to NIST Standards where applicable. Certification in accordance with EN 10204:2004 Type 3.1. All results are actual measured values of either internal testing or certified external testing. Deloro Stellite uses the following Nadcap Certified Labs for External Chemistries, Sherry Labs (Cert # 122524), Dirats Labs (Cert # 117584) or NSL (Cert # 117439). External Lab Reports available on request. The test report shall not be reproduced except in full, without the written approval of the laboratory. NOTE: The recording of false, fictitious or fraudulent statements or entries on this document may be punishable as a felony under Federal Statutes.

Revision 6/20/2011 GKM

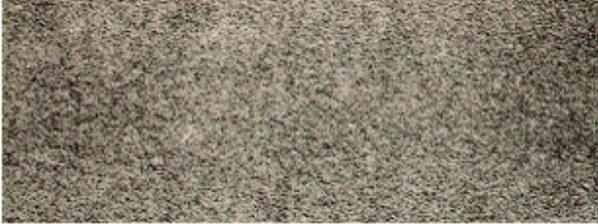
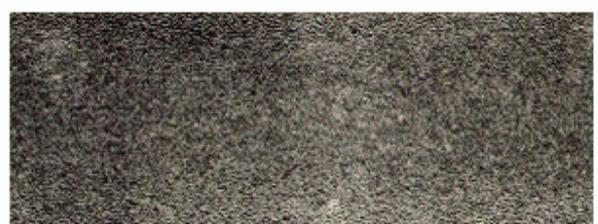
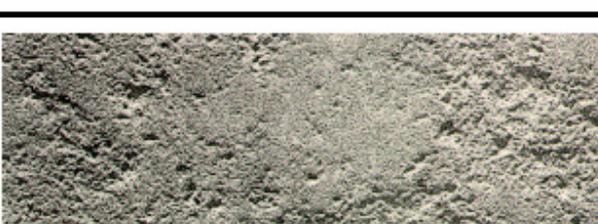


ISO/IEC Guide 17025

ANEXO B – TABELA DE EQUIVALÊNCIA (MM PARA MESH)

ASTM ABNT	TYLER MESH	ABERTURA EM MILÍMETRO
10	10	2.00
12	12	1.65
14	14	1.41
16	16	1.19
18	18	1.00
20	20	0.84
25	25	0.71
30	30	0.59
35	35	0.50
40	40	0.42
45	45	0.35
50	50	0.297
60	60	0.250
70	70	0.210
80	80	0.177
100	100	0.149
120	120	0.125
140	140	0.105
170	170	0.088
200	200	0.074
230	230	0.062
270	270	0.053
325	325	0.044
400	400	0.037
500	500	0.025

ANEXO C – LIMPEZA COM JATEAMENTO ABRASIVO AO METAL BRANCO

	Grau A Sa3
	Grau B Sa3
	Grau C Sa3
	Grau D Sa3