CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE SELANTES EM REVESTIMENTOS ASPERGIDOS TERMICAMENTE COM A LIGA Cr-Ni-Mn

Millena Toledo Belém Cruz

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título em Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Orientador(a): Hector Reynaldo Meneses da Costa

Coorientador(a): Ana Lucia Ferreira de Barros

Rio de Janeiro

Junho, 2021

AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE SELANTES EM REVESTIMENTOS ASPERGIDOS TERMICAMENTE COM A LIGA Cr-Ni-Mn

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Millena Toledo Belém Cruz

Banca Examinadora:

Presidente, Prof. Dr. Hector Reynaldo Meneses da Costa, CEFET/RJ

Coorientadora: Profa. Dra. Ana Lucia Ferreira de Barros, CEFET/RJ

Prof. Dr. Humberto Nogueira Farneze, CEFET/RJ

Prof. Dr. Ricardo Alexandre Amar Aguiar, CEFET/RJ

Prof. Dr. André Rocha Pimenta, IFRJ

Rio de Janeiro

Junho, 2021

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

C957 Cruz, Millena Toledo Belém
Avaliação da aplicação de selantes em revestimentos aspergidos termicamente com a liga Cr-Ni-Mn / Millena Toledo Belém Cruz — 2021.
108f. : il. color. , enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2021.
Bibliografia : f. 103-108
Orientador: Hector Reynaldo Meneses da Costa
Coorientadora: Ana Lucia Ferreira de Barros

1. Aspersão térmica. 2. Revestimentos. 3. Liga de cromo-níquel-manganês. 4. Liga (Metalurgia). 5. Corrosão. I. Costa, Hector Reynaldo Meneses da (Orient.). II. Barros, Ana Lucia Ferreira de (Cooriet.). III. Título.

CDD 671.734

Elaborada pela bibliotecária Tania Mello – CRB/7 nº 5507/04

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram durante todo o processo do mestrado, valendo citar:

- Ao meu marido que foi o primeiro a acreditar e me motivar para participar do processo seletivo;
- Ao professor Paulo Kenedi que desde a primeira conversa foi um ser humano ímpar e me motivou a buscar meu sonho, além de indicar o Professor Hector para ser meu orientador;
- Ao meu orientador, Hector Reynaldo Meneses Costa, que me aceitou como sua orientanda, me ajudou, compreendeu, apoiou, ensinou, com certeza sem ele nada seria possível;
- A minha coorientadora Ana Lucia e sua equipe do laboratório que foram tão importantes no auxílio de testes de análise AFM.
- A empresa VGK Engenharia, pela parceria e apoio.
- A minha família, que sempre torceram por mim, em especial ao meu pai que ficou tão feliz quando iniciei essa jornada e que não estará aqui para ver a conclusão da mesma;
- Ao professor Humberto pelo constante apoio, indicações bibliográficas e no ensaio de corrosão;
- Ao Hiron, funcionário do laboratório de Tecnologia de Materiais do CEFET, que sempre com muita presteza me ajudou nos ensaios realizados;

RESUMO

AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE SELANTES EM REVESTIMENTOS ASPERGIDOS TERMICAMENTE COM A LIGA Cr-Ni-Mn

Millena Toledo Belém Cruz

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Devido ao elevado custo para realizar a manutenção em materiais expostos a ambientes nocivos, tem-se verificados alternativas para aumentar sua vida útil. A Aspersão Térmica tem se destacado no mercado, pois é capaz de proporcionar melhoria nas propriedades mecânicas e minimiza a corrosão do material exposto. Nesse trabalho foi avaliado a aplicação de selantes em revestimentos aspergidos com a liga Cr-Ni-Mn, em que o objetivo é verificar qual oferece uma melhor proteção ao material. Para analisar estes selantes, três condições da amostra foram analisadas, sem selante, com selante de resina epóxi e selante de copolímero. Os seguintes procedimentos foram realizados: Microscopia de Força Atômica (AFM), Ensaio de Polarização Eletroquímica, Microscopia Ótica (MO), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Microdureza. Como resultado das análises por MO e MEV observa-se uma estrutura lamelar uniforme e com presença de defeitos (poros, óxidos e microtrincas). O revestimento apresenta valores de microdureza superior aos valores obtidos no substrato, sendo que a maior microdureza foi de 394 HV, encontrada na amostra que foi selada com o copolímero. A análise AFM demonstrou uma maior rugosidade média para a amostra selada com copolímero. O Ensaio de Polarização Eletroquímica constatou a superioridade do material selado com copolímero referente ao potencial de corrosão.

Palavras-chave: Aspersão Térmica; Selante; Corrosão

Rio de Janeiro
Junho, 2021

ABSTRACT

EVALUATION OF THE APPLICATION OF SEALANTS IN COATINGS THERMICALLY SPRAYED WITH THE ALLOY Cr-Ni-Mn

Millena Toledo Belém Cruz

Abstract of dissertation submitted to Postgraduate Program in Mechanical Engineering and Materials Technology – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Mechanical Engineering and Materials Technology.

Required at high cost to perform maintenance on materials exposed in harmful environments, alternatives have been verified to increase its useful life. Thermal sprinkling has stood out in the market, as it is able to provide improvement in the mechanical properties and minimize the corrosion of the exposed material. In this work, an application of sealants in coatings sprayed with Cr-Ni-Mn alloy was evaluated. The sealants are made of copolymer and epoxy resin, in which the objective is to verify which offers the best protection to the material. To analyze these sealants, three sample conditions were analyzed, without sealant, with epoxy resin sealant and copolymer sealant. The following procedures were performed: Microscopy of the Atomic Force Microscope (AFM), Electrochemical Polarization Assay, Optical Microscopy (MO), Scanning Electron Microscopy (SEM) and Microhardness. As a result of the analysis by MO and SEM there is a lamellar structure, uniform with the presence of defects (pores, oxides and microcracks). The highest microhardness was 394 HV in the sample coating that was sealed with the copolymer and as microhardness for the coatings are higher than the values obtained in the substrate. An AFM analysis with a higher average roughness for the sample sealed with copolymer. The Electrochemical Polarization Test found the superiority of the material sealed with copolymer related to potential for corrosion.

Keywords: Thermal spray; Sealant; Corrosion

Rio de Janeiro
June, 2021

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema do Processo de Aspersão Térmica (AT).....20

Figura 2 – Esquema do ancoramento mecânico da panqueca na superfície rugosa do substrato.....23

Figura 3 - Morfologias de panquecas de alumínio depositadas.....25

Figura 4 - Camada Típica Depositada pelo Processo de Aspersão Térmica.....26

Figura 5 - Tipos de poros que podem ser encontrados no processo de aspersão térmica.....28

Figura 6 – Classificação dos Processos de Aspersão Térmica.....30

Figura 7 – Aspersão Térmica por chama em pó.....32

Figura 8 - Aspersão Térmica por chama com arame.....32

Figura 9 – Pistola da Aspersão Térmica D-Gun.....34

Figura 10 - Esquema de uma Tocha AT supersônica HVOF.....36

Figura 11 – Processo de Aspersão Térmica.....36

Figura 12 – Aspersão Térmica a Arco Elétrico.....38

Figura 13 – Aspersão Térmica com arco transferido x não transferidos.....41

Figura 14 – Formação do Plasma.....43

Figura 15 – Mecanismos de corrosão eletroquímica.....46

Figura 16 – Resumo dos mecanismos de corrosão.....47

Figura 17 – Modificações na dupla camada em um eletrodo submetido a uma polarização anódica e catódica.....48

Figura 18 - Tipos de corrosão.....50

Figura 19 – Arranjo esquemático para levantamento de curvas de polarização.....51

Figura 20 - (a) Extrapolação da reta Tafel [31] e (b) Gráfico Tafel.....53

Figura 21 - Análise AFM em suas três condições (a) com contato; (b) sem contato; (c) intermitente.....54

Figura 22 - Aspersão por Arco Elétrico para revestimento das Placas.....58

Figura 23 - Placa com aplicação de resina.....58

Figura 24 - Placa com aplicação de uma camada de revestimento.....59

Figura 25 - Amostra com e sem aplicação de selante.....60

Figura 26 - (1) Amostra com Selante 1 (superfície mais brilhosa); (2) Amostra com Selante 2; (3) Amostra sem Selante.....61

Figura 27 - (1) Ensaio AFM; (2) Base do Equipamento.....63

Figura 28 - Imagem do programa Easy Scan 2.....63

Figura 29 – Aparato do ensaio de Polarização eletroquímica (1) Computador Pata tratamento de dados (2) Potenciostato (3) Célula eletroquímica.....64

Figura 30 - Célula Eletroquímica.....65

Figura 31 – Processo de soldagem do fio na amostra (1) Rasgo, (2) Solda do fio na amostra (3) amostra pronta com fio condutor.....66

Figura 32 – (1) Amostras após aplicação de isolante líquido (2) Isolante líquido utilizado.....67

Figura 33 - Distribuição das 6 Identações no ensaio de microdureza.....69

Figura 34 - Amostra do material com selante de Resina epóxi. Aumento de 12,5x.....70

Figura 35 - Micrografia da amostra com selante de Resina Epóxi com aumento original de 100x.....71

Figura 36 - Micrografia da amostra com selante de Resina Epóxi com aumento original de 100x.....71

Figura 37 - Micrografia da amostra com selante de Resina Epóxi com aumento original de 50x.....72

Figura 38 - Micrografia da amostra sem selante com aumento original de 12,5x.....72

Figura 39 - Micrografia da amostra sem selante com aumento original de 50x.....73

Figura 40 - Micrografia da amostra com selante de copolímero com aumento original de 12,5x.....73

Figura 41 - Micrografia da amostra com selante de Copolímero com aumento original de 100x.....74

Figura 42 - Micrografia da amostra com selante de Copolímero com aumento original de 50x.....74

Figura 43 - Amostra com Selante de Copolímero (a) análise de ponto por EDS; (b) Espectro de EDS dos elementos do ponto.....77

Figura 44 - Amostra com Selante de Copolímero (a) análise de ponto por EDS; (b) Espectro de EDS dos elementos do ponto.....79

Figura 45 - (a) Morfologia do Espectro 4 (b) Espectro de EDS de linha para a área total.....80

Figura 46 - Defeitos apresentados nas micrografias.....81

Figura 47 - Defeitos apresentados nas micrografias.....81

Figura 48 - Aumento original 2000X, apresentação de defeitos.....81

Figura 49 - Amostra com Selante de Resina Epóxi (a) Ponto de análise por EDS; (b) Espectro de EDS dos elementos do ponto.....82

Figura 50 - Amostra com Selante de Resina Epóxi (a) Ponto de análise por EDS; (b) Espectro de EDS dos elementos por análise de ponto.....82

Figura 51 - Amostra com Selante de Resina Epóxi (a) Ponto de análise por EDS; (b) Espectro de EDS dos elementos do ponto.....83

Figura 52 - (a) Morfologia do Espectro (b) Espectro de EDS de linha para a área.....84

Figura 53 – Aumento original 2000X, apresentação de defeitos.....84
Figura 54 – Aumento original 2000X, apresentação de defeitos.....85
Figura 55 - Aumento original 2000X, apresentação de defeitos.....85
Figura 56 - Amostra 1 com selante de Copolímero.....86
Figura 57 - Amostra 2 com selante de Copolímero.....86
Figura 58 - Amostra 3 com selante de Copolímero.....86
Figura 59 - Amostra 1 com selante de Resina Epóxi.....87
Figura 60 - Amostra 2 com selante de Resina Epóxi.....87
Figura 61 - Amostra 3 com selante de Resina Epóxi.....88
Figura 62 - Amostra 1 sem selante.....88
Figura 63 - Amostra 2 sem selante.....89
Figura 64 - Amostra 3 sem selante.....89
Figura 65 - Média dos valores de Microdureza da Amostra sem selante.....91
Figura 66 - Média dos valores de Microdureza da Amostra com Selante de Resina Epóxi 92
Figura 67 - Média dos valores de Microdureza da Amostra com Selante de Copolímero 93
Figura 68 - Média dos valores de Microdureza de acordo com cada condição.....94
Figura 69 – Pontos de medida que foram analisados com o teste F 96
Figura 70 – Gráfico Tafel para amostra com selante de Resina Epóxi.....98
Figura 71 - Gráfico Tafel para amostra sem selante.....98
Figura 72 - Gráfico Tafel para amostra com selante de Copolímero.....98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos processos de aspersão por combustão.....30
Tabela 2 - Gases e Temperatura de chama.....31
Tabela 3 - Taxas de Pulverização de arco elétrico.....39
Tabela 4 - Características dos processos de polarização e passivação.....49
Tabela 5 - Composição do Substrato.....56
Tabela 6 – Composição dos arames no processo de Aspersão a Arco Elétrico.....57
Tabela 7 - Especificações das Placas.....59
Tabela 8 - Verificação da Rugosidade das Amostras.....86
Tabela 9 - Verificação da Rugosidade das Amostras.....87
Tabela 10 - Verificação da Rugosidade das Amostras.....88
Tabela 11 - Montagem da Rugosidade Média por amostra.....89
Tabela 12 - Valores de Microdureza Vickers da Amostra sem selante.....91
Tabela 13 - Valores de Microdureza Vickers da Amostra com Selante de Resina Epóxi.....92
Tabela 14 - Valores de Microdureza Vickers da Amostra com Selante de Copolímero.....93
Tabela 15 - Média dos valores de Microdureza de acordo com cada condição.....94
Tabela 16 – Dados para determinação do Fcrítico com 95% de confiabilidade.....96
Tabela 17 - Cálculo de F para o Ponto de medida 1.....97
Tabela 18 - Fcalculado para os pontos de Medida.....97
Tabela 19 - Valores obtidos através do ensaio de corrosão eletroquímica.....99

SUMÁRIO

Introdução.....16

1- Revisão Bibliográfica.....18

1.1 Características da Aspersão Térmica.....18

1.1.1 Preparo da Superfície.....21

1.1.2 Texturização.....21

1.1.3 Aderência.....22

1.1.4 Camadas Intermediárias.....24

1.1.5 Preaquecimento.....24

1.1.6 Características dos revestimentos obtidos por Aspersão Térmica.....26

1.1.6.1 Porosidade.....27

1.1.6.2 Óxidos.....29

1.2 Processos de Aspersão Térmica.....29

1.2.1 Aspersão Térmica por combustão.....30

1.2.1.1 Chama Convencional – FS (Flame Spray) 31

1.2.1.2 D-Gun.....33

1.2.1.3 HVOF.....35

1.2.2 Aspersão Térmica por Energia Elétrica.....37

1.2.2.1 Arco Elétrico.....37

1.2.2.2 Plasma.....40

1.3 Aplicação de Selantes.....43

1.4 Corrosão.....44

1.4.1 Formas de Corrosão.....49

1.4.2 Método Experimental para Determinação da Corrosão.....50

1.4.2.1 Curvas de Polariazação Experimentais.....50

1.4.2.2 Curva Tafel.....52

1.5 Análise AFM.....53

2- Metodologia.....56

2.1 Características do Material e do Revestimento.....56

2.1.1 Corpos de prova.....57

2.1.2 Preparação das Amostras para microscopia.....61

2.2 Preparação Metalográfica das Amostras.....62

2.3 Análise AFM(Análise do Microcópio de Força Atômica).....62

2.4 Ensaio de Polarização Eletroquímica.....64

2.5 Microscopia Ótica (MO).....67

2.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....68

2.7 Microdureza.....68

3- Resultados.....70

3.1 Microscopia Ótica (MO).....70

3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....76

3.3 Análise AFM.....85

3.4 Microdureza Vickers.....90

3.5 Ensaio de Polarização Eletroquímica.....98

4- Conclusão.....101

5- Sugestões para Trabalhos Futuros.....102

6- Referência Bibliográfica.....103

Introdução

Corrosão é um dos fenômenos que mais afeta a deterioração de materiais, principalmente nos ambientes marinhos que possui uma atmosfera de trabalho muito agressiva. A corrosão é responsável por, em média, 30% das falhas em equipamentos, havendo assim um custo anual elevado, com o objetivo de minimizar esse transtorno, o uso de revestimentos tem sido utilizado apresentando resultados bastante satisfatórios. De forma geral, os materiais estão sujeitos a deterioração, seja por ação mecânica, química ou eletroquímica. Há casos em que o material sofre a ação desgaste-corrosão [1,2,3].

O revestimento das superfícies por materiais que são mais resistentes a corrosão é conhecido como proteção por barreira. Dentre os métodos de revestimento pode-se citar soldagem e imersão a quente que expõe o metal base a altas temperaturas em que há mais aderência com o substrato, mas, em contrapartida, pode sofrer transformações microestruturais indesejáveis. Por outro lado, a aspersão térmica é um método de deposição a frio que obtêm menor aderência com o substrato, mas não há as modificações em sua microestrutura, além de permitir reparos em menor tempo e com custos inferiores [4].

Os processos de aspersão térmica possuem versatilidade na deposição dos revestimentos. Devido não haver alteração microestrutural no material base, pois o processo ocorre em baixas temperaturas, ela pode ser aplicada em materiais que apresentam baixo ponto de fusão, como os termoplásticos e não há contraindicação para ser utilizado em materiais que possuem alto ponto de fusão, como os materiais metálicos [5].

O processo de aspersão pode ter variações básicas como materiais utilizados, tipo de fonte de energia com o objetivo de aquecer ou fundir estes materiais e no método de propulsão das partículas aspergidas para o substrato. No geral, os materiais ideais que possam ser utilizados através do uso da aspersão térmica devem ser estáveis em temperaturas elevadas. Os processos de aspersão térmica possuem aplicação na fabricação e manutenção. A quantidade de componentes e variáveis presentes no processo é grande e quando são adequadamente escolhidos e devidamente aplicados produzem um efeito melhor [6].

Assim como tem se expandido o uso da aspersão térmica, o uso de selantes também tem se tornado cada vez mais comum, com o objetivo de bloquear os poros, evitando a falha prematura do componente mecânico [6].

Este estudo tem como objetivo analisar o efeito da aplicação de dois tipos de selantes sobre o revestimento de liga Cr-Ni-Mn, através do processo de aspersão térmica por arco elétrico. Um dos selantes possui uma base de resina epóxi curada com poliamida. O segundo selante estudado é um copolímero em meios solventes orgânicos. A metodologia empregada

foi a avaliação dos selantes e revestimento através das técnicas por Microscopia ótica (MO), Microscopia Eletrônico de Varredura (MEV) com EDS (espectroscopia de energia dispersiva), Microdureza, Análise AFM (Análise de Força Atômica) e Corrosão Eletroquímica.

1. Revisão Bibliográfica

Este capítulo, foi dividido em cinco partes, no primeiro o Processo de Aspersão Térmica, suas características, situações a serem utilizadas. Na segunda parte, será abordado os tipos de aspersão a serem utilizados de acordo com a necessidade do processo considerando seus pontos negativos e positivos. No terceiro tópico será abordado sobre a aplicação de Selantes. E na quarta e quinta parte serão explicados sobre a execução e importância do teste da corrosão eletroquímica e a realização da análise AFM, respectivamente.

1.1 Características da Aspersão Térmica

A aspersão térmica, é uma tecnologia que possui um grupo de processos que são utilizados na deposição de revestimentos metálicos ou não metálicos em uma superfície previamente preparada.

A utilização do revestimento como reforço surge como opção para proteção de desgaste mecânico e a corrosão para componentes mecânicos em diversas condições. O processo de aspersão térmica é uma das técnicas utilizadas para a modificação da superfície com o objetivo de evitar ou retardar sua deterioração. Ela ganha um destaque por ser um processo que utiliza uma variedade de ligas para deposição e possibilidade de aplicação em diversos tipos de substrato [7].

Aspersão térmica, também conhecida no Brasil como metalização ou projeção térmica, consiste em um grupo de processos utilizados para o revestimento no qual metais fundidos são pulverizados numa superfície previamente preparada. Com relação ao processo de aspersão térmica há vantagens e desvantagens de sua utilização [8,9]:

Vantagens

- O revestimento possui proteção anticorrosiva imediata;
- Boa adesão para aplicação de selantes;
- Baixíssimo teor de compostos orgânicos voláteis da camada base emitidos para a atmosfera;
- Possibilidade de aplicação em temperaturas próximas a 0^{o}C;
- Alta resistência a trabalhos com soldagem próximos às áreas já metalizadas;
- Para processos de combustão ou arco elétrico, os equipamentos são pequenos, portáteis e permitem a utilização fora da fábrica;

- Com um bom controle, o risco de degradação do substrato reduz durante o processo de aspersão térmica.

Desvantagens

- Preparo de superfície de melhor qualidade e mão de obra mais treinada, podendo ter um custo inicial mais alto;
- O alumínio aplicado por arco elétrico gera uma quantidade razoável de alumínio e óxido de alumínio na atmosfera. Estes resíduos podem se tornar explosivos caso não se tenha as devidas precauções. O zinco aplicado por arco elétrico emite gases tóxicos podendo causar no operador a “febre de zinco”, caso não esteja devidamente protegido.

Por definição, aspersão térmica (Thermal Spray) é um conjunto de processos nos quais se divide finamente materiais metálicos e não metálicos que são depositados em uma condição fundida ou semifundida, sobre um substrato preparado para formar um depósito aspergido [10].

O revestimento adquirido pelo método da aspersão térmica, atua como barreira, com o objetivo de proteger o material do processo corrosivo em diferentes ambientes corrosivos como a atmosfera, ambientes offshore, dentre outros [11].

Os processos de metalização por aspersão térmica oferecem inúmeras vantagens, dentre as quais, elevar a resistência superficial ao desgaste e corrosão pela deposição de revestimentos, com o objetivo de aumentar a vida útil de sistemas e peças para melhorar seus desempenhos [7].

A quantidade de componentes e variáveis presentes no processo é grande e quando são adequadamente escolhidos e devidamente aplicados produzem um efeito melhor. Os materiais que são depositados são fundidos ou aquecidos em uma fonte de calor que é gerada no bico de uma pistola e que pode vir da queima de um gás combustível ou da geração de um arco elétrico. Ocorrendo a fusão, o material aquecido deve imediatamente ser acelerado por gases sob pressão, confinados em um feixe, contra a superfície a ser revestida (substrato), atingindo-a no estado fundido ou semifundido. Quando se chocam contra a superfície, as superfícies achatam-se formando lamelas que aderem o material base, e após sobre as partículas existentes, formando uma camada (revestimento) de estrutura típica e diferente de qualquer outra forma metalúrgica. Essas camadas constituídas por pequenas partículas achatadas em direção paralela ao substrato, com estrutura lamelar contendo inclusões de óxidos, vazios e porosidade [6].

A aspersão é um método considerado versátil, econômico e eficiente, aumentando a resistência e durabilidade ao material revestido, sendo utilizado para manutenção preventiva através do revestimento de componentes [11].

A Aspersão térmica possui a capacidade de fundir materiais como metais, cerâmicos, polímeros e compósitos. Este processo necessita de três elementos base fundamentais [9]:

- Uma fonte de calor;
- Uma liga sobre a forma de arame, pó, cordão ou barra;
- Um jato de ar comprido ou gás.

A aderência da superfície depende de quatro etapas, limpeza, rugosidade da superfície, camada de ligação e pré-aquecimento. Na Figura 1 é demonstrado o processo com seus componentes necessários para a Aspersão Térmica [9,12].

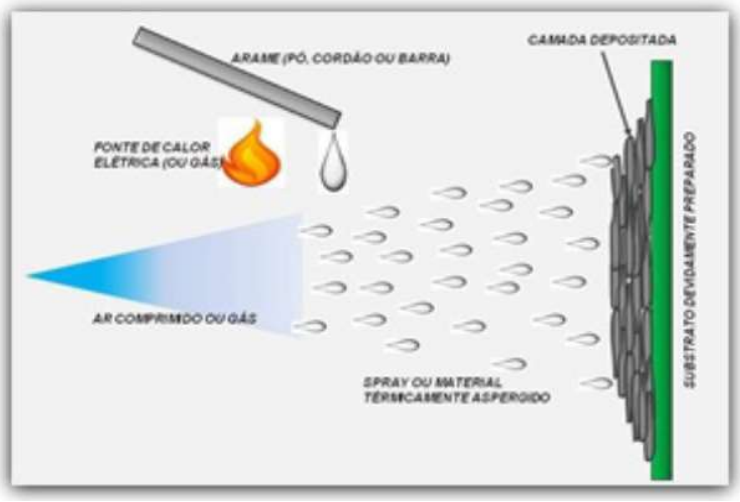


Figura 1- Esquema do Processo de Aspersão Térmica (AT) [9]

Este processo de aplicação de revestimento é muito comum em indústrias petroquímicas, petróleo e gás, petroquímica, aeroespacial, metalomecânica, aeronáutica e têxtil [11].

A aspersão por arco elétrico, utilizado neste trabalho, como fonte de energia é amplamente usada pois possui a maior taxa de deposição, fácil operação tanto manual quanto automatizada, baixo custo com consumíveis, enfim, baixo custo geral, bons níveis de aderência e coesão interlamelar, possibilidade de aplicação mesmo em temperaturas próximas de 0°C, como também adesão para aplicação de selantes considerada boa ou sistemas de pintura subsequentes, sendo um processo de fácil e rápida manutenção. Os equipamentos necessários são relativamente pequenos, permitindo sua aplicação em campo. Porém há algumas desvantagens do processo a arco que ficam por conta dos revestimentos

que têm tipicamente altos níveis de porosidade, óxidos e partículas não fundidas, que podem influenciar diretamente na resistência mecânica e química do revestimento. Os tipos de materiais que podem ser aplicados pelo processo a arco estão limitados a arames sólidos ou tubulares que sejam condutores [7].

1.1.1 Preparo da Superfície

Sendo este o primeiro passo para preparação do substrato para a ocorrência da aspersão térmica, deve-se manter a superfície isenta de contaminantes, como, crosta de óxido, ferrugem, graxa, óleos e umidade que estão contidos na superfície impedindo o contato do material aspergido com a superfície [7].

O objetivo da limpeza é retirar o substrato de impurezas sólidas, líquidas e pastosas. Vale ressaltar que é fundamental prover a superfície determinado grau de rugosidade, com o intuito de melhorar a adesão, e consequentemente a qualidade do revestimento. Esta rugosidade pode ser obtida através de jateamento abrasivo, usinagem, entre outros [4].

A superfície a ser aspergida deve estar limpa e ficar com um grau de rugosidade bem definido, para que ocorra uma boa aderência do revestimento. A preparação é a etapa mais crítica do processo de aspersão térmica. Isso ocorre devido a adesão do revestimento está diretamente relacionada a limpeza e rugosidade da superfície [4,6].

O preparo adequado da superfície possui como finalidade permitir que as partículas propelidas tenham no momento do impacto, a máxima aderência [12].

Mesmo a superfície dos materiais metálicos quando expostas ao ar atmosférico em curto espaço de tempo obtêm um filme de óxido que agrega água, óleos, poeiras. Logo, após a limpeza não se pode demorar para aplicação do revestimento ou prever um modo de proteger a superfície dos contaminantes [7].

A limpeza pode ser realizada de forma mecânica ou química. O processo de limpeza mecânica é caracteriza pela abrasão para que camadas superficiais sejam removidas através da interação com um material que possui maior dureza, este processo pode ser realizado por lixamento, escovação ou jato abrasivo. A limpeza química é dividida em três categorias a detergência, o desengraxe e a decapagem ácida [7].

1.1.2 Texturização

A texturização possui como objetivo tornar a superfície mais rugosa e capilar. A superfície rugosa faz a mesma possuir maior aderência do que a superfície quando está polida, isso ocorre devido ao aumento da sua área superficial [9].

A rugosidade é definida pela Norma ABNT NBR ISSO 4287:2002, sendo possível a obtenção de padrões para determinação de valores da R_a (rugosidade média) a serem utilizadas no processo. Em geral, utiliza-se uma R_a no intervalo de 2,5 a 13 µm, para a maioria dos revestimentos. Para um revestimento com espessura de camada menor, os valores de rugosidade são mais baixos, de R_a de 1,3 µm. Em caso de revestimentos de plásticos em metais ou ligas de baixo ponto de fusão, é recomendado uma R_a de 6 µm [8].

Para obtenção de limpeza e a rugosidade da superfície desejada, a técnica mais utilizada é o jateamento abrasivo, principalmente em peças de grande porte. O processo consiste no choque de partículas abrasivas na direção do substrato com velocidades relativamente altas [9].

De acordo com o tipo do substrato, dureza, espessura, tamanho da peça, tipo de revestimento, condição da superfície antes da execução da limpeza, técnica de jateamento abrasivo usada, os graus de limpeza e a rugosidade desejada, será possível selecionar o abrasivo mais adequado. Os abrasivos devem estar secos, limpos, pontudos e cortantes, além de livres de quaisquer contaminante [6].

Os abrasivos influenciam na velocidade de jateamento. Quando as partículas abrasivas são de tamanhos grandes, esféricas ou arredondadas não é recomendado sua utilização, pois tornam a operação mais lenta. Por outro lado, o impacto de partículas com formas angulares, duras ou pontudas acarretam no arrancamento do material da superfície, proporcionando mais irregularidades e pontos de ancoramento, que são favoráveis a aderência do material depositado, possuindo melhores resultados [13].

Para possuir bons resultados, o ângulo do jato abrasivo deve ser entre 75 e 90º. Além disso, a distância do bocal aos substratos pode varias de 10 a 30 cm, essa variação da distância depende do tamanho e tipo de abrasivo utilizado, a abertura do bocal e a capacidade do equipamento. O tempo do jateamento é algo que se deve ficar atento, uma vez que jateamento excessivo pode resultar em textura de superfície inadequada. De acordo com Sá Brito, 2010 [6] um tempo de 3 a 4 segundos, em geral, é suficiente para se obter a rugosidade média.

1.1.3 Aderência

É um requisito fundamental para que se tenha um bom revestimento, pois não adianta ter um revestimento de boa qualidade, com boa espessura, livre de porosidade e não ter aderência com o substrato [7].

A aderência é a capacidade do revestimento em resistir a sua retirada por tração. Define-se como a adesão entre as partículas e o substrato e a coesão entre as partículas das várias camadas sobrepostas [8].

As propriedades físicas e o comportamento mecânico de um revestimento de um revestimento aspergido dependem [8]:

- Aderência entre as lamelas e o substrato;
- Resistência coesiva entre as lamelas;
- Tamanho e morfologia dos poros;
- Presença de trincas;
- Microestrutura das lamelas.

Há três mecanismos de análise da aderência do revestimento, que são as forças atuantes: ancoramento mecânico, químico-metalúrgico e físico. Sendo assim, a aderência é uma combinação desses três mecanismos [14].

Ocorrendo o impacto das partículas aquecidas e aceleradas com o substrato, as mesmas se achatam numa forma lenticular, resfriam-se rapidamente e ancoram de modo mecânico nas irregularidades existentes na superfície, conforme demonstrado na Figura 2.

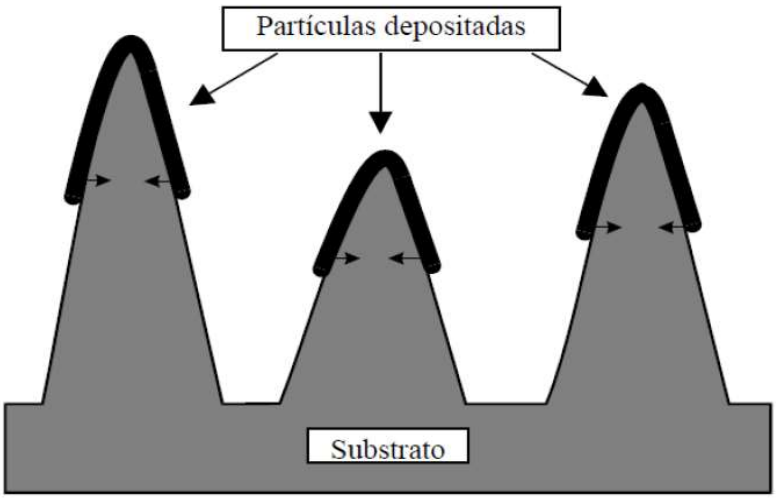


Figura 2- Esquema do ancoramento mecânico da panqueca na superfície rugosa do substrato [14]

De acordo com a natureza do material e do calor transferido pela partícula ao substrato, ocorre um maior ou menor grau de micro soldagem, deste modo pode haver fusão localizada, difusão atômica com formação de soluções sólidas e compostos intermetálicos, demonstrando o mecanismo de aderência químico-metalúrgico [5].

A aderência física, é formada por ligações fracas que contribuem para atração interatômica do material, em que o componente mais importante de ligação entre as moléculas são as interações entre dipolos elétricos [5].

A qualidade dos revestimentos necessariamente depende do tratamento prévio da superfície do substrato como também das condições de operação da aspersão térmica. A qualidade da aderência ao substrato é uma das principais características para os revestimentos. Deste modo, a análise da integridade estrutural dos revestimentos é necessária para garantir a segurança e a confiabilidade das peças revestidas [8].

1.1.4 Camadas Intermediárias

Os materiais para as camadas intermediárias ou de ligação possuem afinidade para formar com o material do substrato uma forte ligação interatômica, física ou de difusão. Em geral, são finos e responsáveis por produzir uma superfície rugosa para a adesão do revestimento.

Essas camadas são aplicadas em materiais muito duros para passarem pelo processo de texturização, ou tão moles que sofreriam deformação [8].

As camadas de ligação, em geral, são aplicadas em aços endurecidos por tratamento de tempera e superligas. Devem ser utilizadas em casos que o jateamento abrasivo ou a usinagem não podem ser utilizados.

Com a aplicação das camadas de ligação pode-se eliminar a necessidade de preparação da superfície através do jato abrasivo ou usinagem, simplificando o processo de aspersão térmica. No entanto, há indicações que apontam para a preparação combinada com o objetivo de obter a máxima adesão necessária, a preparação combinada consiste em uma usinagem grosseira do substrato seguido de jateamento abrasivo e após aplicação de camada de ligação [7].

1.1.5 Preaquecimento

O preaquecimento do substrato no processo de aspersão térmica possui como objetivo eliminar a umidade existente na superfície, além de queimar ou volatizar resíduos oleosos que em alguns casos estão presentes na superfície [9].

O material deve ser preaquecido a temperaturas entre 90 a 150ºC, sendo possível retirar facilmente os resíduos presos na superfície. No entanto, o material não pode ser exposto a altas temperaturas por tempos longos, podendo ocorrer a produção de camadas espessas de óxidos [8].

O preaquecimento auxilia no alívio de tensões internas influenciando na aderência do revestimento. Isto é possível através do fornecimento de mais calor envolvido durante o processo, com o objetivo de a dilatação e a contração das partículas ocorram da forma mais natural possível [7]. A Figura 3 demonstra as morfologias de panquecas de alumínio depositadas em que um lado foi realizado o preaquecimento e no outro não, sendo assim possível comparar os substratos antes do processo de aspersão.

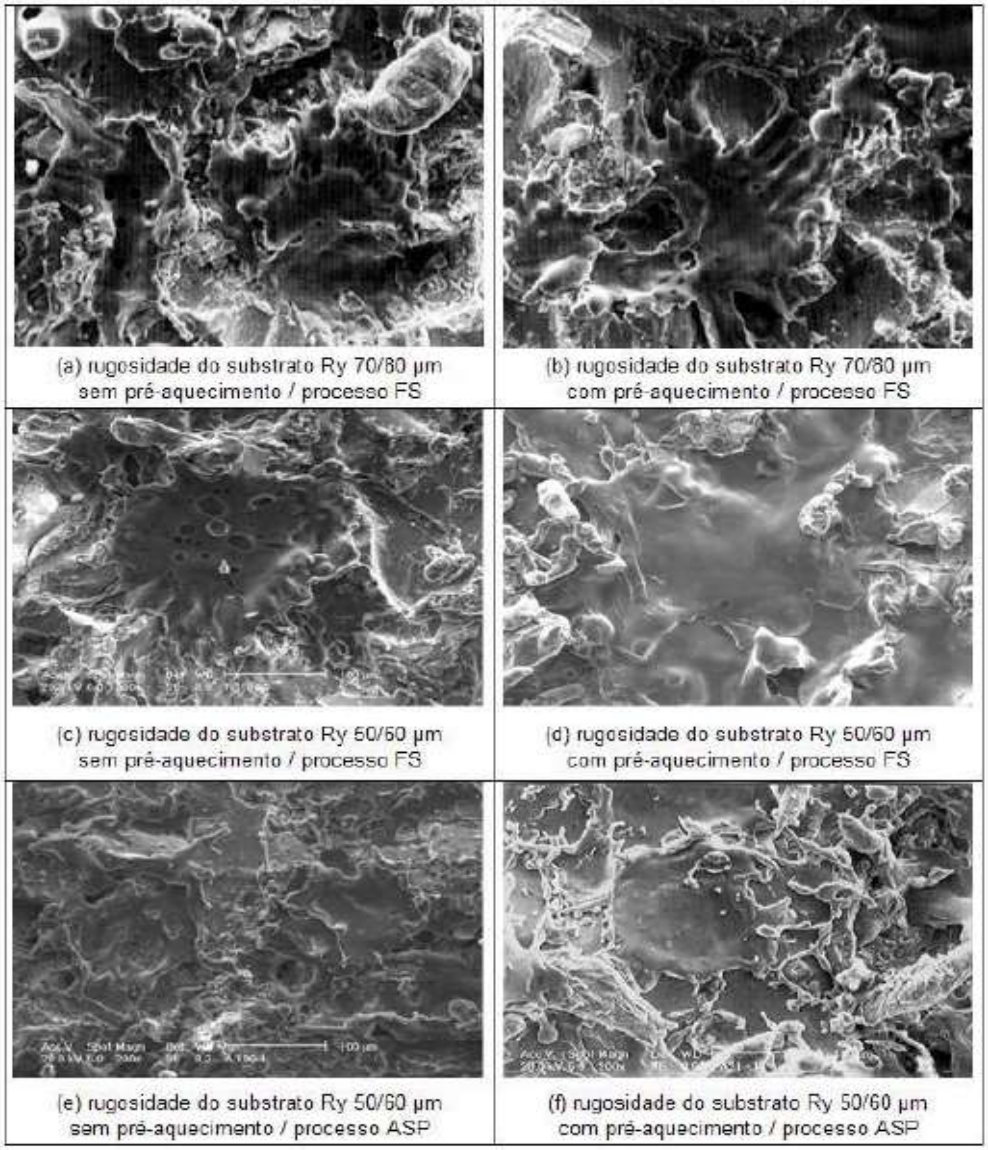


Figura 3 - Morfologias de panquecas de alumínio depositadas [7]

Comparando as superfícies com e sem preaquecimento, verifica-se que quando o mesmo ocorre fornece um melhor ancoramento das partículas aspergidas. Isto ocorre porque ele é capaz de fornecer mais calor ao processo, mantendo o calor envolvido por um tempo maior. Portanto, proporciona tempo suficiente para que as partículas aspergidas fundidas

possam penetrar na rugosidade da superfície e resfriar-se lentamente. Caso isso não ocorra, as partículas se solidificam rapidamente havendo pouca penetração na rugosidade existente no substrato [9].

Pode-se afirmar que a menor rugosidade e o preaquecimento do substrato melhoram significativamente o efeito molhamento, formando uma panqueca homogênea mesmo que com alguns salpicos que não prejudicam a aderência, em contrapartida, a partícula sem preaquecimento não produz o efeito molhamento homogêneo e ainda apresenta muitos salpicos que reduz a aderência [7].

1.1.6 Características dos revestimentos obtidos por Aspersão Térmica

Através da aspersão térmica, há o aquecimento de partículas micrométricas, que são aquecidas até que se fundam, após são impulsionadas contra a superfície da peça por meio de um gás atomizante. Ao se chocarem contra a superfície do substrato, as partículas se solidificam e formam o revestimento [11].

A macroestrutura dos revestimentos é conhecida como lenticular ou lamelar porque as gotículas líquidas que vão sendo formadas em sucessivas camadas se achatam e se solidificam a uma velocidade extremamente alta (devido a energia cinética que lhes são conferidas) e se ancoram mecanicamente no substrato. Então a estrutura típica de revestimento aspergido é formada por lamelas do material depositado com presença de inclusões de óxidos, micro trincas, partículas sólidas e porosidades formando um conjunto de imperfeições ou defeitos em uma camada de revestimento [7].

A Figura 4 mostra a camada típica em corte depositada pelo processo de aspersão térmica.

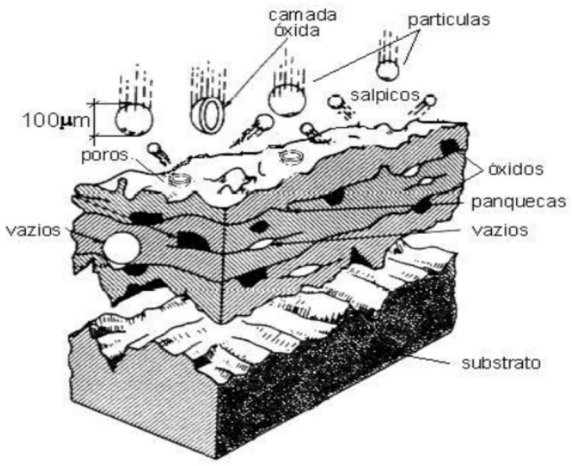


Figura 4 – Camada Típica Depositada pelo Processo de Aspersão Térmica [7]

A estrutura lamelar ou panquecas, são compostas pelas partículas que foram totalmente ou parcialmente fundidas do material depositado. Estas se deformam devido ao impacto sobre a superfície aspergida e se superpõem formando camadas contínuas de revestimento na forma de lamelas. O formato das panquecas influencia diretamente o desempenho do revestimento [11].

Após o impacto com a superfície, as panquecas se formam através da fusão das partículas que se deformam e se espalham com o objetivo de preencher os interstícios produzidos pela própria rugosidade da superfície. No entanto, essas interfaces da estrutura lamelar formadas pelas panquecas podem gerar defeitos como poros e trincas [15].

As partículas que formam o revestimento por aspersão térmica, podem ser em formato de panquecas e em formato de disco ou disco com salpicos [11].

As partículas em forma de disco possuem maior adesão ao material depositado do que as partículas de discos com salpicos. Essa melhor adesão ocorre devido a geometria regular das partículas de discos, em que há um aumento na densidade do revestimento havendo uma melhor coesão as lamelas que o formam [11].

1.1.6.1 Porosidade

Os poros, encontrados em revestimentos de pulverização térmica, ocorrem principalmente devido as lacunas de ar entre a partículas pulverizadas. É comum em revestimentos pelo processo de aspersão térmica, obter uma porosidade de até 20% [10,8].

Essas lacunas permitem a penetração de líquidos e gases por esses vazios, acarretando uma degradação do revestimento. A quantidade de poros existente em um revestimento depende do material a ser utilizado e das condições da aspersão térmica [6,16].

Sendo a porosidade inerente à maioria dos processos convencionais de aspersão térmica, foi classificado em sete os tipos de porosidades que podem ser encontrados durante o processo. Essas porosidades podem ser visualizadas na Figura 5 [16,13].

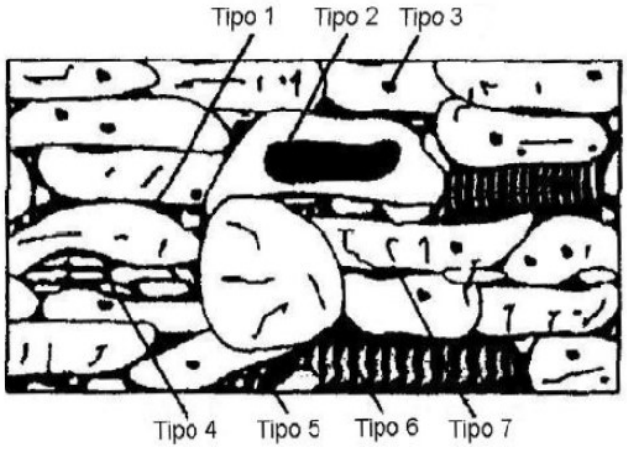


Figura 5- Tipos de poros que podem ser encontrados no processo de aspersão térmica [16,13]

- Tipo1: porosidade formada entre as lamelas e causada pelo empilhamento de partículas separadas. Este tipo de porosidade pode estar relacionado ao tamanho da partícula aspergida e a característica do material de alimentação.
- Tipo 2: devido ao processo de turbulência do fluxo de gás durante o processo de aspersão, ocorre a porosidade formada por bolsas de gás preso.
- Tipo 3: porosidade na forma de bolhas de gás devido a dissolução do gás no metal fundido, esta porosidade se desenvolve devido ao resfriamento do metal.
- Tipo 4: porosidade acarretada pela desintegração de partículas sólidas após o impacto, ocorre no processo de deposição.
- Tipo 5: porosidade devido a condensação de partículas parcialmente evaporadas e que foram identificadas como partículas contendo resíduos de pó.
- Tipo 6: porosidade resultante de contração de solidificação.
- Tipo 7: porosidade que possui como resultado microtrincas, independe de sua origem de formação.

A porosidade é responsável pela propagação de trinca, devido a formação de microtrincas que surgem na estrutura do revestimento impactando as propriedades mecânicas e o módulo de elasticidade [9].

Fatores como gás de arraste utilizado, distância da tocha ao substrato, material utilizado como revestimento, pré-aquecimento do substrato, condições de aspersão e a preparação da superfície são os principais na influência da quantidade de poros [9].

Propriedades mecânicas como, condutividade térmica, elétrica e o módulo de elasticidade são deterioradas de acordo com a quantidade de poros, pois reduzem a área transversal efetiva do revestimento [8].

1.1.6.2 Óxidos

Os óxidos são inclusões não metálicas que se formam devido à reação das partículas aspergidas com o ar ou oxigênio durante o processo. Estão no revestimento em formato de pontos pretos sendo vistos na seção transversal do revestimento [9].

As inclusões de óxidos aumentam a dureza do revestimento. Quando o teor de óxido é alto, pode haver dificuldade de coesão entre as camadas depositadas, em consequência há redução da força coesiva do revestimento. Portanto, as inclusões de óxidos são consideradas prejudiciais as propriedades dos revestimentos aumentando a porosidade do revestimento e reduzindo a adesão [6].

Para observação dos óxidos encontrados nos revestimentos pode-se utilizar a microscopia ótica. Esses óxidos são as fases escuras e alongadas e podem ser vistos na seção transversal do revestimento, paralelos ao substrato [8].

Há parâmetros que podem reduzir as inclusões de óxidos [8]:

- Uso de câmaras de gases inertes, remover de ambiente reativo;
- Redução da temperatura média das partículas, através da redução do poder calorífico dos jatos de aspersão;
- Redução da temperatura na superfície através de jatos de ar ou aumentar a velocidade de aspersão;
- Controle da distância entre a pistola e o substrato.

O controle da distância é vital para a qualidade do revestimento. Oxidação em movimento, perda de energia cinética durante o transporte das partículas e temperatura da partícula no impacto estão relacionados com a distância [8].

1.2 Processos de Aspersão Térmica

A classificação dos processos de aspersão térmica dá-se em função dos métodos de geração de energia, que são energia elétrica e combustão. A Figura 6 representa a classificação dos processos de AT.

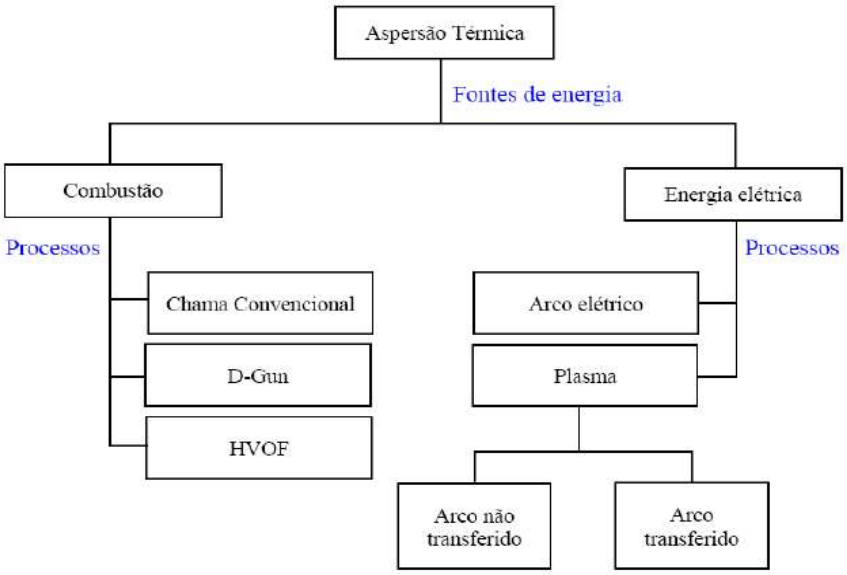


Figura 6 – Classificação dos Processos de Aspersão Térmica [17]

1.2.1 Aspersão Térmica por Combustão

O processo de aspersão térmica por combustão utiliza a queima de gases combustíveis para aquecer e/ou fundir o material aspergido. Os possíveis materiais que podem ser usados nesse processo encontram-se os metais e ligas metálicas [18,19]. A Tabela 1 demonstra os parâmetros alocados no processo de aspersão por combustão.

Tabela 1: Características dos processos de aspersão por combustão [18]

Parâmetros	Informações
Material	Pó (Metais e Cerâmicos) Ligas de Metais e Polímeros
Temperatura de chama	Max. 3100 ˚C
Velocidade das Partículas	Acima de 50 m/s
Deposição do Processo	35 a 150 g/min

O gás mais utilizado é o acetileno pois possui maior temperatura de chama. Substâncias que se fundam e não sublimem em temperaturas abaixo de 2760 ºC pode ser pulverizada por aspersão térmica por combustão. Na Tabela 2, são demonstrados os gases combustíveis e sua temperatura de chama correspondente [20].

Tabela 2: Gases e Temperatura de chama

Combustível	Temperatura ^{0}C
Propano + Oxigênio	2640
Hidrogênio + Oxigênio	2690
Gás Natural + Oxigênio	2735
Acetileno + Oxigênio	3100

O ar comprimido, no geral, é o responsável pela pulverização e aceleração das partículas do material com o substrato. O gás combustível é usado com o único objetivo de fundir o material de revestimento. Sendo assim, as partículas oxidam pela presença de oxigênio contido no ar, sendo prejudicial a aderência. Portanto, um gás inerte pode ser utilizado para substituir o ar comprimido, reduzindo o efeito oxidante [20].

Para metais e ligas metálicas os materiais de revestimento podem ser em arame, cordão ou pó, e em materiais cerâmicos, na forma de vareta, cordão ou pó [20].

O processo de aspersão térmica por combustão é divido em três tipos descritos a seguir:

1.2.1.1 Chama Convencional – FS (Flame Spray)

Este processo também é conhecido como chama oxiacetilência, foi através deste processo que houve início a aspersão térmica [4]. Neste processo é usado a energia gerada pela combustão de um gás combustível misturado com o oxigênio com o objetivo de fundir o material de deposição que pode ser na forma de pó ou arame [17].

Na chama convencional, pode-se utilizar tochas adaptadas para usar diversas combinações de gases e ligas, considerando a otimização de custos e qualidade dos revestimentos, devido ao baixo custo e possibilidades de altas temperaturas, o acetileno é o gás mais utilizado [19].

Na aspersão térmica a chama utilizando o material de aporte o pó, possui a alimentação de gás de modo axial e a alimentação do pó para a pistola ocorre por força da gravidade, onde as partículas possuem a mínima velocidade no momento do encontro com a chama. Neste momento ocorre a fusão e um jato de ar comprimido as projeta contra o substrato, obtendo assim, uma menor resistência adesiva e coesiva, e uma maior porosidade Figura 2 [17].

O pó para alimentação pode ser um metal puro, uma liga, um compósito, uma cerâmica, um carboneto ou qualquer combinação destes, tendo uma taxa de alimentação de 50 a 100 g/min, conforme a Figura 7 [17].

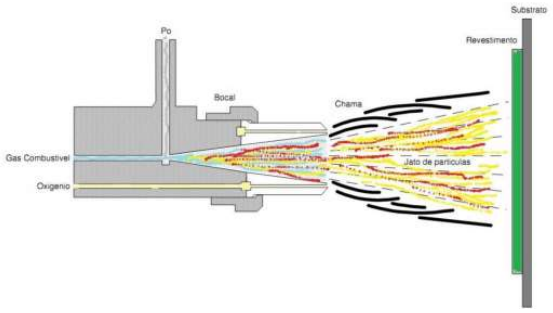


Figura 7- Aspersão Térmica por chama em pó [20]

Na aspersão térmica a chama, que utiliza arame ou vareta, o equipamento deve possuir um sistema de alimentação que pode ser através de roletes que são tracionados por motor elétrico, pneumático ou uma turbina de ar. Na Figura 8, demonstra-se o caso que é utilizado o arame no processo [17].

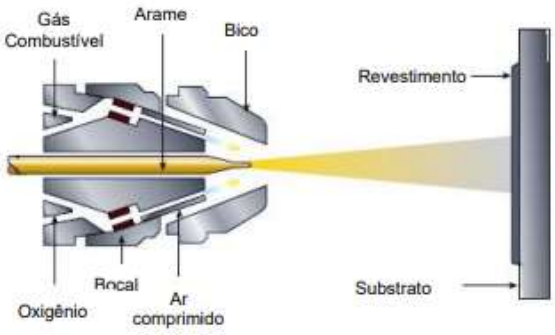


Figura 8- Aspersão Térmica por chama com arame [20]

O arame, que deve ser alimentado de modo contínuo, alimenta o bocal da chama através de roletes alimentadores, que se encontram na região posterior a tocha. A chama funde o material consumível e auxilia na pulverização, junto ao ar comprimido, ou um gás inerte em certas aplicações. O gás inerte pode ser utilizado para reduzir a oxidação, porém prejudica a aderência do revestimento [21].

Características técnicas à chama [22]:

- Porosidade: 10-20%;
- Espessuras depositadas: 100-2500 μm (0,1 – 205 mm);
- Distância para aspersão: 120-250 mm
- Ângulo da pistola: 90º;
- Diâmetro do arame: 3 – 6 mm;
- Temperatura da chama: 2700 – 3100ºC;
- Tamanho das partículas de pó: 5 – 10 μm (0,005 – 0,1 mm);
- Razão oxigênio/ combustível: 1:1 (atmosfera redutora), 1, 1:1 (atmosfera oxidante);
- Pressão e vazão de oxigênio e combustível dependente do tipo de pistola;
- Meio gasoso de transporte das partículas fundidas – N_2, O_2, CO, CO_2, etc;

Vantagens e desvantagens do processo de chama convencional, são citadas: [19]

Vantagens:

- Alta temperatura da chama;
- Fácil manuseio;
- Baixo custo dos equipamentos e de manutenção;
- Permite a aplicação de três tipos de camadas: 1- Ligas para camadas fundidas, resistentes à corrosão e oxidação; 2 - Ligas com carbetos, recomendadas para condições de abrasão severas; 3- Ligas com cerâmicas, resistentes ao desgaste, calor e abrasão, funcionam como isolantes térmicos e elétricos.

Desvantagens:

- Elevada densidade de poros;
- Alto índice de óxidos;
- Processo de aspersão térmica de baixa energia.

1.2.1.2 D-Gun

Este processo de aspersão térmica possui maiores velocidades que são obtidas devido a seguidas explosões controladas (1 a 15 por segundo) no interior de um canhão que está carregado com partículas do material a ser aspergido e mistura de gases combustíveis, como acetileno ou propano-butano, com oxigênio [19].

As detonações provocam um ruído na ordem de 150 dB, havendo necessidade de instalações especiais com isolamento acústico. Por isso é um processo mecanizado [20].

Este processo possui uma grande vantagem que é a aplicação de carbonetos com excelente força de ligação, dureza e densidade. A pistola desse processo é constituída basicamente por um cano longo resfriado a água, com válvulas de entrada para os gases e o pó por onde a mistura é alimentada que é inflamada pela centelha de uma vela de ignição, resultando em uma explosão. Esta explosão é responsável por gerar ondas de detonação de alta pressão e temperatura, fundindo e acelerando as partículas do material, que estão sempre em pó, em alta velocidade, para fora da pistola, resultando em um depósito duro, denso e bem aderente. A temperatura atinge em média 3.900 ºC, velocidade de saída das partículas em 750 m/s e o ciclo de purga que possui uma frequência de 3 a 6 Hz. Através da Figura 9, pode-se visualizar o funcionamento de uma pistola para a aspersão.

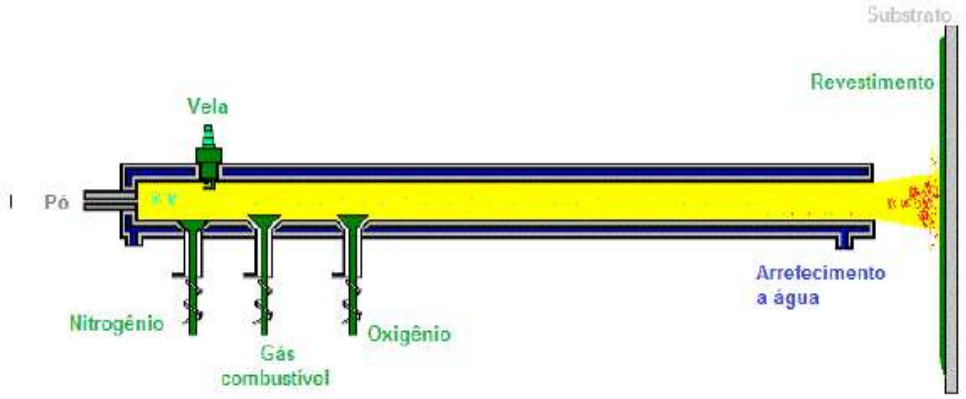


Figura 9- Pistola da aspersão térmica D-Gun [23]

Características técnicas [22]:

- Porosidade: 0,5% para WC-Co, 2% para Al_2O_3;
- Taxa de alimentação de pó: 0,96 – 2,4 kg/h;
- Distância da aspersão: 100 mm;
- Ângulo de aspersão: pode alcançar valores inferiores ao processo plasma;
- Diâmetro do ponto aspergido: 25 mm;
- Espessura por ciclo de ponto aspergido: 3 -10 µm (0,003 – 0,01 mm);
- Aderência da camada: >83 MPa (WC-Co), >70 MPa (Al_2O_3);
- Espessuras depositadas: 0,3 mm;

Vantagens e desvantagens do processo D-Gun, são citadas [22]:

Vantagens

- Baixa densidade de óxidos e poros;
- Parte considerável do material metálico, cerâmico ou *cermets* pode ser depositado por este processo;
- Revestimento denso, duro e com elevada resistência adesiva;

Desvantagens

- Alto ruído;
- Baixa taxa de alimentação;
- Elevado custo inicial e de manutenção. Isso ocorre devido ao elevado custo de materiais utilizados e por ser uma operação automatizada e controlada remotamente possui um alto custo inicial.

1.2.1.3 HVOF

O Processo de Aspersão Térmica HVOF" (aspersão térmica por High Velocity Oxy-Fuel – aspersão térmica a chama de alta velocidade) consiste na geração de partículas metálicas num jato de exaustão de alta velocidade proveniente da combustão da mistura de um combustível gasoso ou líquido (propileno, hidrogênio, propano ou querosene) com oxigênio, cuja razão de vazão oxigênio / gás determina a temperatura da chama [17].

A velocidade de pulverização pode alcançar em média 1.200 m/s podendo chegar até 5.000 m/s com pistolas mais modernas. A grande diferença desse processo com o de chama convencional é o uso de jatos supersônicos, resultando em revestimentos com densidades de porosidade menores. A chama pode atingir de 2.500 até 3.100 °C, daí a câmara de combustão tem que ser refrigerada a todo instante com água. A Figura 10 demonstra esquematicamente uma tocha de HVOF [18].

A alta velocidade é responsável pelo menor tempo de permanência no trajeto bocal/substrato e aumento da energia das partículas, obtendo revestimentos mais densos com menores teores de poros e óxidos, como também há maior favorecimento do mecanismo de aderência metalúrgico [4].

Este processo gera baixa porosidade às peças (inferior a 1%) e alta adesão ao substrato. Deve-se atentar para o manuseio dos gases envolvidos no processo. Pode ser

utilizado como consumível pó ou arame a serem pulverizados com taxas de aspersão de 2,3 a 14 Kg/h. Em geral, utiliza-se o pó como consumível, que é acelerado por um gás transportador e injetado na chama, além de possuir o mesmo sentido de fluxo que o gás expandido, Figuras 10 e 11[24].

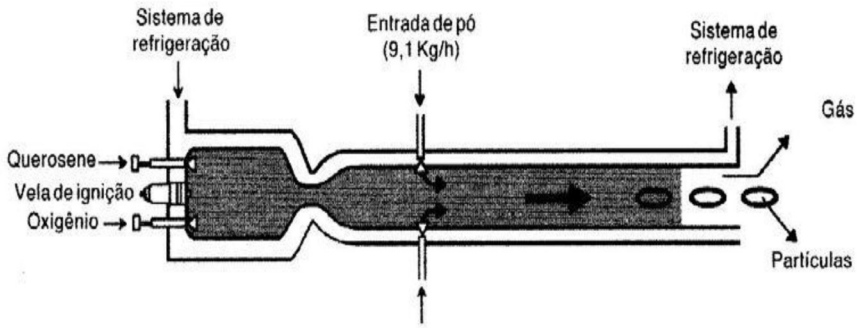


Figura 10 – Esquema de uma Tocha AT supersônica HVOF [17]

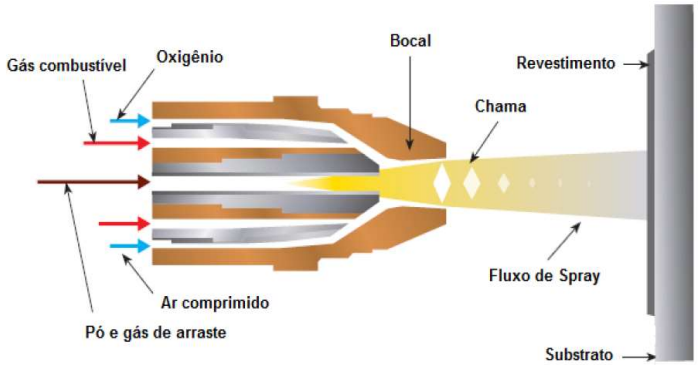


Figura 11 – Processo de Aspersão Térmica [18]

Características técnicas [19]:

- Porosidade: < 1%;
- Taxa de alimentação do pó: 1,2 – 4,8 Kg/h;
- Distância da aspersão: 150 – 300 µm
- Aderência: > 90 MPa;
- Pressões típicas do gás combustível: 3 – 7 atm.

Vantagens e desvantagens do processo HVOF, são citadas [22,25]:

Vantagens

- Baixo ataque térmico ao substrato;
- Possibilidade de deposição de diversos revestimentos com alta adesão;
- Baixa Porosidade (comparando com os demais processos de aspersão);
- Elevada resistência adesiva;
- Baixo custo inicial de equipamentos e instalação;
- Excelente resistência ao desgaste e à corrosão;
- Os revestimentos podem ser usinados com dimensões finais de acabamento.

Desvantagens

- Alto nível de ruídos, em média de 140 dB;
- Funcionários precisam de boa qualificação para operar equipamentos;
- Há a necessidade de maiores cuidados e dispositivos, principalmente de segurança. [9]

1.2.2 Aspersão Térmica por Energia Elétrica

Nesta aspersão térmica a fonte de energia é a energia elétrica e há dois processos que são plasma e arco elétrico.

Na aspersão térmica por energia elétrica o arco elétrico é utilizado como fonte de calor, composto por uma descarga elétrica produzida por uma diferença de potencial em um meio gasoso parcialmente ionizado [20].

1.2.2.1 Arco Elétrico

Este processo começou a ser comercializado na em 1960, ele utiliza o arco elétrico como fonte de calor com o objetivo de fundir o arame de deposição. Diferente dos outros processos de aspersão em que o aquecimento das partículas é proporcionado por jatos de gás aquecido, esse processo utiliza corrente contínua através da diferença de potencial adquirida entre os dois fios de eletrodos consumíveis. Um item limitante a esta técnica é a necessidade de os materiais aplicados terem de ser eletricamente condutores [18].

Os arames eletricamente condutores, devem ser um positivo (anodo) e outro negativo (catodo), eles são colocados continuamente em contato um com o outro com um ângulo

predeterminado. Um arco é fechado entre os dois arames possuindo uma ddp (diferença de potencial) de 18 a 48 V. A temperatura é próxima a 4000ºC e com velocidade de 50 a 150 m/s, conforme Figura 12 [20].

As partículas que se fundiram são aceleradas por um jato, que contém a mistura de ar comprimido e argônio, em direção a superfície do substrato. Após o resfriamento dessas partículas, é formada a camada de revestimento.

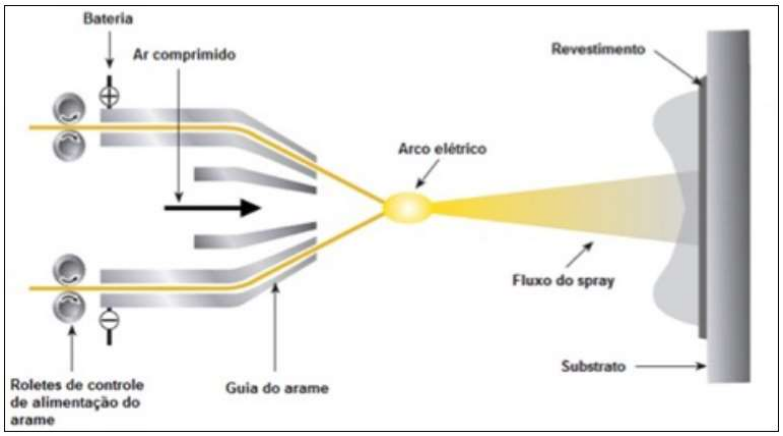


Figura 12 - Aspersão Térmica a Arco Elétrico [9]

Esse é um processo de média/ alta energia, onde produz índices de óxidos menores se comparado ao processo de aspersão de chama. Com o aumento da diferença de potencial entre os arames há o aumento do comprimento do arco e do tamanho das gotículas, obtendo um menor índice de porosidade na camada mais densa. Com o objetivo de obter revestimentos densos e com melhor acabamento, a diferença de potencial deve estar em valores mínimos compatíveis com a estabilidade do arco [18].

A energia em forma de elétrons é repassada da pistola para os arames, assim há uma maior concentração de calor na pistola do que no substrato. Portanto, haverá mais calor na fusão das partículas aspergidas antes de atingir o substrato. Como não há uma chama, gases de combustão tocando o substrato, seu aquecimento é menor [17,9].

A velocidade de depósito das partículas aspergidas deve ser mantida alta, proporcionando uma melhor adesão devido ao maior impacto que essas partículas sofrerão, através do aumento da velocidade [9].

Comparando este processo com o de chama com relação a aderência do revestimento, constata-se que o arco elétrico possui uma aderência superior de 3 a 4 vezes,

considerando os mesmos parâmetros com relação a deposição da liga sobre o substrato. Comparando com relação as taxas de deposição, também são significativamente mais altas, devido a corrente, a velocidade do arame e principalmente o uso de dois arames em vez de um, o tornando econômico a aplicação de revestimento em grandes superfícies [18].

Na Tabela 3 é correlacionado os consumíveis com suas respectivas taxas de deposição:

Tabela 3: Taxas de Pulverização de arco elétrico [18]

Arame	Consumo (g/min) / 100A dc
Alumínio	45
Latão	83
Cobre	83
Molibidênio	76
Aço	76
Aço Inoxidável	76
Estanho	341
Titânio	23
Zinco	182

Sendo necessário produzir camadas depositadas mais compactas e densas, deve-se adicionar dispositivos adicionais com o objetivo de elevar a velocidade de atomização das partículas reduzindo assim a porosidade. Os fatores que controlam essa taxa de deposição são a corrente elétrica e a taxa de alimentação do arame necessária para esta corrente. [18]

Características técnicas [22]:

- Potência elétrica: 5 a 10 kW;
- Temperatura do arco: 5.800 °C a 280 A de corrente;
- Voltagem: 18 a 40 V;
- Distância de aspersão: 50 a 170 mm;
- Pressão do gás de atomização: 0,2 a 0,7 MPa;
- Vazão de gás atomizado: 1 a 80 m³/h;
- Aderência da camada: 10 a 30 MPa (Zn e Al), 70 MPa (ligas NiAl);
- Porosidade: 2 a 10%;
- Espessuras típicas depositadas: 100 a 1.500 µm;

- Ângulo de aspersão: melhores resultados a 90º;
- Taxa de deposição: 3 a 18 kg/h;
- Diâmetros típicos dos arames: 2 a 5 mm.

Vantagens e desvantagens do processo de aspersão por arco elétrico, são citadas [19]:

Vantagens

- Tocha leve e compacta;
- Diversas ligas para revestimento;
- Ligação metalúrgica entre o substrato e o depósito;
- Elevado desempenho na aderência do revestimento;
- Elevadas taxas de deposição;
- Aumento de produtividade devido a alimentação constante do arame.

Desvantagens

- O material do revestimento deve ser eletricamente condutivo;
- Uso do gás inerte para transporte de partículas, em aplicações especiais, reduzindo a oxidação do revestimento;
- Alta concentração de porosidade;
- Oxidação das partículas quando transportadas pelo ar comprimido.

1.2.2.2 Plasma

Devido a necessidade de a indústria aeroespacial possuir um controle mais eficaz da corrosão e também da alta variação de temperatura, em que seus componentes estariam expostos. Sendo assim, materiais cerâmicos e carbetos foram desenvolvidos, no entanto, não puderam ser utilizados devido a exigência de temperaturas para sua fusão e sobreaquecimento além das que são obtidas pela aspersão térmica seja por combustão ou arco elétrico. Deste modo, foi desenvolvido a aspersão térmica por plasma. Como pode ser visto na Figura 13, a aspersão por plasma pode ser por arco transferido ou arco não transferido. No primeiro caso, o arco atinge a peça de trabalho e assim fecha o circuito elétrico.

Já no segundo caso, o arco elétrico é gerado entre um catodo de tungstênio e um anodo de cobre, [20].

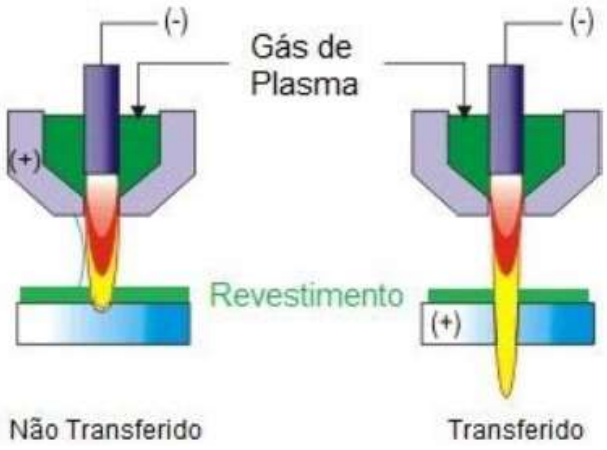


Figura 13 - Aspersão Térmica com arco transferido x não transferido [20]

Para a aspersão por plasma onde o arco não é transferido, ele é comprimido entre um eletrodo de tungstênio e um bocal de constrição. Atravessando o arco elétrico, o gás inerte (argônio, nitrogênio, hidrogênio, hélio ou mistura) é aquecido e ionizado gerando o plasma.

A temperatura do gás plasma varia de 5.000 a 25.000 ºC, dependendo das misturas dos gases, a velocidade das partículas varia de 80 a 300 m/s. Fatores como o tipo de bocal constritor, taxa de alimentação do pó, ângulo de injeção, vazão do gás e as configurações de energia, são importantes para o processo e afetam a fusão. Uma característica positiva do processo é sua versatilidade em mudanças de temperatura do plasma, velocidade das partículas e nas condições de operação [18].

Vantagens e desvantagens do processo de aspersão por plasma onde o arco não é transferido, são citadas [22]:

Vantagens

- Densidade alta dos revestimentos;
- Altas taxas de deposição;
- Altas espessuras por passe.

Desvantagens

- A manipulação da cabeça da tocha é difícil;
- Alto custo de operação;

Para a aspersão por plasma onde o arco é transferido recebe a capacidade de aquecimento e fusão superficial do substrato. Neste processo, um arco é estabelecido entre o eletrodo não consumível do maçarico de plasma e a própria peça de trabalho. A matéria-prima, sob a forma de arame ou de pó, é introduzida no plasma externamente. O material é fundido e aspergido sobre o substrato, onde é produzido uma ligação metalúrgica semelhante ao processo de soldagem [18].

Este processo possui alta energia e utiliza gás inerte no processo de deposição. Geralmente utiliza argônio para abastecimento do plasma, transporte e barreira de proteção ao material depositado. Ele realiza, com qualidade, a deposição de diversas ligas, principalmente para proteção ao desgaste, corrosão e choque térmico. Há ligas para realizar o reparo dimensional, enquanto outras são projetadas para ser uma sobreposição final para proteção da superfície do material [18].

Vantagens e desvantagens do processo de aspersão por plasma onde o arco é transferido, são citadas: [22]

Vantagens

- Não possui escória;
- Altas taxas de deposição;
- Elevada ligação metalúrgica;
- Consome menos energia em comparação ao processo de aspersão térmica por plasma de arco não transferido.

Desvantagens

- Alteração microestrutural do substrato;
- Somente pode ser realizado em substratos eletricamente condutivos e que suportam alguma deformação;

Plasma é um dos estados físicos existentes da matéria, similar ao gás, em que há uma quantidade de partícula ionizada. A adição de energia nas moléculas da matéria modifica as forças eletromagnéticas de ligação de seus átomos. A transformação de estado físico ocorre

do sólido para o líquido e após do líquido para o gás, sendo o plasma considerado um quarto estado físico da matéria. Em que sendo adicionado mais energia, ocorre a dissociação das ligações moleculares, levando-o à ionização. Na Figura 14, é possível visualizar que as moléculas de gás são divididas em partículas que estão carregadas por íons e elétrons livres [17,20].

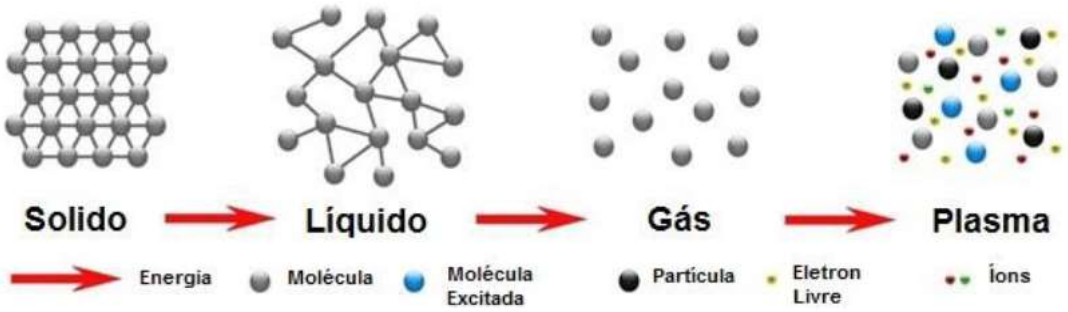


Figura 14- Formação do Plasma

Através da injeção contínua de gás no gerador de plasma, que atravessando uma descarga elétrica é ionizado, forma-se o plasma. Após sua formação, o mesmo é dirigido a superfície a ser tratada.

1.3 Aplicação de Selantes

Após a realização do Processo de Aspersão a aplicação de selantes possibilita uma durabilidade maior da camada de revestimento, com o objetivo de proteger o substrato e o revestimento da ação corrosiva. O selante escolhido, deve possuir uma boa capacidade de penetração, com o objetivo de vedar poros e microtrincas existentes da camada de revestimento e consequentemente reduzir a porosidade [9].

Os métodos de impregnação dos selantes são divididos em quatro categorias [26]:

- Impregnação da pressão atmosférica – apenas esta é economicamente viável para componentes maiores;
- Impregnação de baixa pressão – adequado para pequenos componentes; A eficiência desta impregnação está relacionada na remoção de umidade e ar dos poros, aumentando a profundidade de penetração. Este ar residual dentro dos poros cria uma força oposta que limita a penetração do selante.
- Impregnação de sobre pressão – adequado para pequenos componentes; usada principalmente em casos que o selante não molha a superfície do revestimento.

- Uma combinação dos tipos de impregnação.

A escolha do método de impregnação depende de fatores como, o tamanho do componente a ser revestido, a profundidade de penetração necessária e o selante utilizado [26].

Com o objetivo de evitar qualquer tipo de contaminação do revestimento, a vedação deve ocorrer imediatamente após a pulverização, quando o revestimento ainda está quente, porém abaixo da temperatura de cura. Dificilmente isso ocorre na prática [27].

A vedação com a utilização de selantes, é um processo com o objetivo de proteção para fechar os poros que se encontram próximos a superfície do material. Estes selantes isolam os poros e impedem que estes fiquem abertos para a superfície, reduzindo assim a área exposta ao meio corrosivo e consequentemente minimizando a corrosão [11].

Os selantes podem ser formados por compostos orgânicos, resinas sintéticas, (ex.: epóxi, silicone, poliésteres), esses são os mais comuns ou inorgânicos, que são geralmente destinados a aplicações com altas temperaturas [27].

Além da proteção contra a corrosão, a aplicação de selantes possui vantagens como: a redução do contato dos poros com sujeira e outros contaminantes do meio, a redução da rugosidade superficial do material, alisamento da superfície que mantém o material mais limpo e a obtenção de diferentes colorações através de pigmentos inseridos no selante, dispensando em muitos casos a necessidade de pinturas adicionais [11].

Quando o selante é líquido, para que seja efetivo, deve possuir propriedades como: Penetração necessária no revestimento; O modo que ocorre a cura deve estar de acordo ao tamanho do componente (isso significa que, componentes grandes não podem ser curados no forno); O encolhimento da cura deve ser o menor possível; Fatores ambientais devem ser considerados pois o solvente a evaporação não é desejável; Os solventes que podem ter sido utilizados na cura selante devem ser removidos adequadamente com o objetivo de evitar o amolecimento [26].

Em casos em que o selante é sólido, as propriedades devem ser: Ter durabilidade química contra o meio ambiente; ter a resistência de temperatura necessária; reter ou melhorar as propriedades funcionais da superfície do revestimento; obter uma quantidade mínima de tensão de tração no revestimento [26].

1.4 Corrosão

Segundo Gentil [28], a corrosão é a deterioração de um material, em geral metálico, através da ação química ou eletroquímica do meio ambiente em conjunto ou não a esforços

mecânicos. A deterioração causada pela interação físico-química entre o material e o seu meio operacional representa alterações prejudiciais indesejáveis, sofridas pelo material, tais como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais, tornando-o inadequado para o uso.

Devido a corrosão, que é considerado um processo espontâneo, os materiais geralmente metálicos são transformados, deixando de exercer as funções para os quais são destinados pois seu desempenho e durabilidade são prejudicados. A corrosão ocorre nas mais diversas áreas, tais como: meios de transporte aéreo, marítimo, metroviário, ferroviário, rodoviário, indústrias químicas, petrolífera, petroquímica, naval, de construção civil e automobilística [28].

De acordo com Serrão [29], os problemas oriundos de corrosão correspondem a 29% das falhas nas plantas industriais, sendo, a corrosão o maior indicador desse item, justificando assim a importância do seu estudo. Precedido a corrosão, encontram-se a fadiga (25%), fratura frágil (16%), sobrecarga (11%), corrosão em alta temperatura (7%), corrosão sob tensão (6%), fluência (3%) e desgaste, abrasão e erosão (3%).

Os procedimentos de corrosão ocorrem geralmente entre o metal e o meio corrosivo através de reações químicas heterogêneas ou reações eletroquímicas. Os processos de corrosão são considerados como reações de oxiredução dos metais, de forma que o metal age como redutor, cedendo elétrons que são recebidos por uma substância oxidante presente no meio corrosivo. Deste modo, a corrosão é uma forma de destruição do metal, que progride através de sua superfície. Ela se dá por diferentes formas (Figura 18), que podem ser identificadas conforme a aparência ou forma de ataque e pelas diferentes causas da corrosão e seus mecanismos [28].

A corrosão pode ocorrer por ação química, eletroquímica ou eletrolítica. A corrosão química no geral ocorre em altas temperaturas como em caldeiras, fornos e é um processo que corresponde ao ataque de um agente químico diretamente sobre o material, sem transferência de elétrons de uma área para outra, não ocorrendo a geração de corrente elétrica. No caso de um metal ou liga, o processo consiste em uma reação química entre o metal e o meio corrosivo, resultando na formação de um produto de corrosão na superfície metálica [30].

A corrosão eletroquímica é um processo natural, que ocorre quando o material ou liga está em contato com um eletrólito (água do mar, ar atmosférico com umidade, solo, dentre outros), onde há simultaneamente as reações anódicas (oxidação) e catódicas (redução). Na corrosão eletroquímica os elétrons são cedidos em determinada região e recebidos em outra, aparecendo uma pilha de corrosão. Esse processo possui três etapas principais [29]:

- Reações anódicas: Oxidação, dissolução do metal, ocorrendo passagem dos íons para a solução;
- Transferência dos elétrons da região anódica para a catódica por meio do eletrólito e difusão de ânions e cátions na solução;
- Reações catódicas: Redução do metal por meio da recepção de elétrons na área catódica, pelos íons ou moléculas existentes na solução. A Figura 15, ilustra alguns mecanismos de corrosão eletroquímica de um metal em meios distintos.

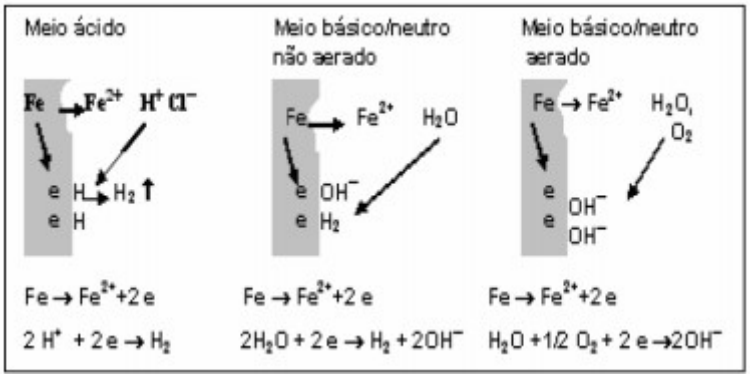


Figura 15: Mecanismos de corrosão eletroquímica [29]

Uma reação deve ser considerada eletroquímica quando associada a passagem de corrente elétrica por uma distância determinada, mas que deve ser maior que a distância interatômica. Essa corrente contém, íons, elétrons ou ambos [31].

Para que haja uma reação é necessário que as espécies reagentes tenham a energia necessária para superar barreiras energéticas. Uma vez que o metal é mergulhado na solução aquosa, inicia-se a reação, em que há formação de íons dentro da solução e a permanência dos elétrons dentro do metal. Estes elétrons carregam eletricamente o metal e criam um campo elétrico dentro da solução, onde os íons, carregados positivamente, tendem a ficar retidos na vizinhança da interface metal-solução. Em um tempo relativamente curto, há uma situação de equilíbrio [28].

A corrosão eletrolítica é um processo eletroquímico, que depende de uma corrente elétrica externa para ocorrer, sendo assim um processo que não é espontâneo de corrosão. Ela é provocada por correntes de fuga, também denominadas de parasitas ou estranhas, que abandonam o seu circuito normal e passam a fluir pelo solo ou pela água. Este tipo de corrosão ocorre em tubulações enterradas ou submersas (como oleodutos, gasodutos, cabos telefônicos e tanques de postos de gasolina). Essas correntes são devidas as deficiências de isolamento ou de aterramento, fora de especificações técnicas. Geralmente ocorrem furos

isolados nas instalações, onde a corrente escapa para o solo ou água [29]. A Figura 16 demonstra de modo compilado os mecanismos de corrosão abordados.

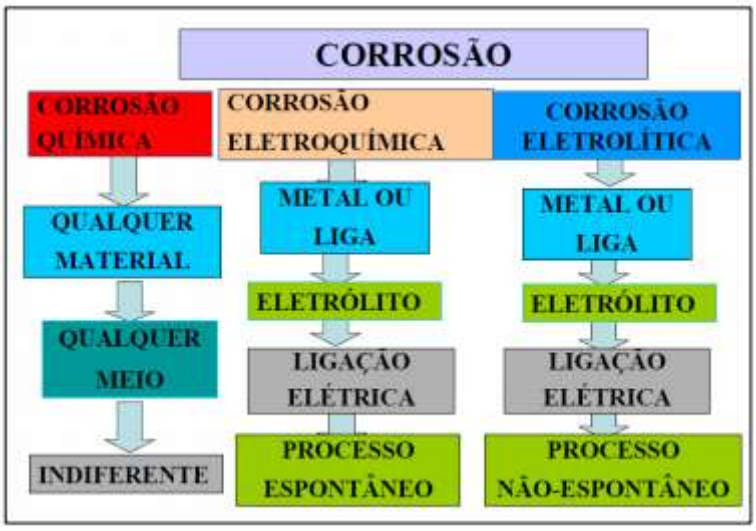


Figura 16: Resumo dos mecanismos de corrosão [29]

O potencial de circuito aberto é considerado o experimento eletroquímico mais simples, em que há dois eletrodos submersos no mesmo eletrólito, assim a corrente flui e muda o potencial do eletrodo de teste para o circuito aberto, o valor do potencial demonstra a magnitude da corrente no potenciostato [32].

Os processos de verificação de corrosão em meio aquoso, que correspondem em particular o da corrosão eletroquímica, são os que são utilizados mais frequentemente. Para a realização deste processo ocorre na água líquida e devido a formação de pilhas de corrosão e em temperatura abaixo do ponto de orvalho [33].

A corrosão eletroquímica e a determinação da resistência a corrosão podem ser obtidas através de técnicas de determinação de potencial do circuito aberto, curva de polarização anódica, polarização catódica e polarização linear, essas são algumas das técnicas existentes [6].

A taxa de corrosão é determinada através das curvas de polarização e para que a mesma ocorra o potencial de equilíbrio da reação catódica tem que ser maior que o potencial de equilíbrio da região anódica. Sendo assim, o potencial de corrosão é fornecido pela intersecção da curva de polarização anódica com a de polarização catódica [28].

A polarização é quando o potencial de um eletrodo modifica devido a variações de concentração, sobre voltagem ou variação de resistência ôhmica. Sem o efeito da polarização as correntes entre anodos e catodos seriam muito elevadas, semelhantes a um curto circuito,

aumentando consideravelmente o processo corrosivo. Devido a estes fenômenos, a taxa de corrosão na prática é significativamente inferior as que ocorreriam se as pilhas funcionassem ativamente em todas as condições dos processos corrosivos [33]. Sendo assim, a polarização é a diferença entre o potencial do eletrodo quando há corrente elétrica e o seu potencial de circuito aberto, medindo o afastamento da reação em relação a seu estado estacionário.

Se a corrosão for controlada por polarização nas áreas anódicas, então a reação está controlada anodicamente e o eletrodo está sob efeito de uma polarização anódica. Porém, se as reações forem controladas por polarização nas áreas catódicas, logo, a reação será controlada catodicamente e o eletrodo estará sob efeito de uma polarização catódica. Ainda a corrosão pode ser controlada pelo aumento da resistência de contato das regiões anódicas e catódicas, então será controlada ohmicamente. Em geral, pode-se haver um controle misto das reações de corrosão, conforme Figura 17.

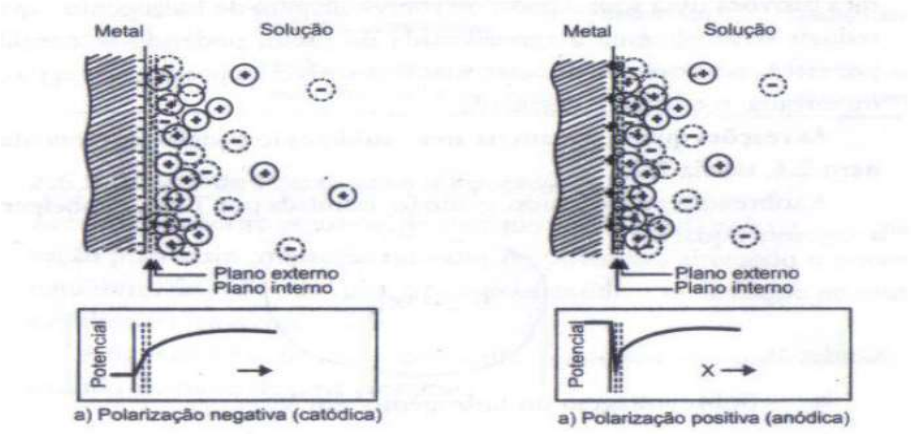


Figura17- Modificações na dupla camada em um eletrodo submetido a uma polarização anódica e catódica [33].

A polarização pode ser por concentração, por ativação ou ôhmica. Na Tabela 4, é possível observar esquematicamente as características desses processos de polarização [6].

Tabela 4: Características dos processos de polarização e passivação [6].

Tipo		Conceituação	Ocorrência	Consequência
Polarização	Concentração	Modificação do potencial de eletrodo por variação de concentração em eletrólitos com pouco movimento	Áreas anódicas e catódicas	Polarização anódica ou catódica
	Ativação	Modificação do potencial de eletrodo por absorção de um gás, em especial o hidrogênio	Principalmente nas áreas catódicas	Polarização catódica
	Ôhmica	Modificação do potencial de eletrodo por variação da resistência ôhmica	Áreas Catódicas	Polarização catódica
Passivação		Modificação do potencial de eletrodo devido à formação da película passivante	Em toda a superfície do material	Formação de uma película passivante

Há a passivação quando a taxa de corrosão reduz devido a formação de uma película passivante de corrosão. Então os metais e ligas metálicas que se passivam são formadores de películas passivantes [28].

1.4.1 Formas de corrosão

A corrosão pode ocorrer de diversas formas, sendo essas definidas principalmente por sua morfologia da superfície, em que as mais comuns são [28]:

- Corrosão alveolar: a corrosão ocorre na superfície metálica produzindo sulcos ou escavações semelhantes a alvéolos. Possui fundo arredondado e profundidade geralmente menor que o seu diâmetro.
- Corrosão por placas: a corrosão encontra-se em superfície metálica e não em toda a sua extensão, formando placas com escavações.
- Corrosão puntiforme por pite: a corrosão se processa em pontos ou em pequenas áreas, porém com altas intensidades localizadas na superfície metálica produzindo pites. Geralmente possuem profundidade maior que o diâmetro e bordas angulosas.
- Corrosão uniforme: quando a corrosão se processa em toda a superfície, em que acarreta perda uniforme de espessura. Este modelo é comum em metais que não formam película protetor.

- Corrosão intergranular: quando a corrosão ocorre no contorno dos grãos, como por exemplo em aços inoxidáveis austeníticos sensitizados, expostos a meios corrosivos.
- Corrosão transgranular: quando a corrosão se manifesta sob a forma de trincas que se propagam pelo interior dos grãos do metal.

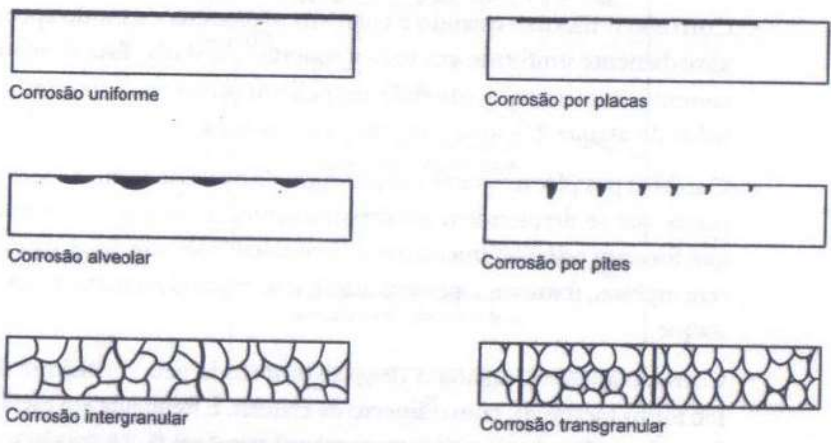


Figura 18- Tipos de corrosão [28]

As taxas de corrosão demonstram a velocidade que a corrosão é percebida na superfície metálica. Essa avaliação deve ser realizada do modo mais acurado possível pois é através dela que será determinado a vida útil de equipamentos e instalações industriais.

1.4.2 Método Experimental para Determinação da Corrosão

Os testes de corrosão permitem estudar e assim reduzir a corrosão dos materiais e, consequentemente, os riscos físicos e custos que ocorrem devido a corrosão. A seguir será apresentada a técnica de determinação de corrosão utilizada neste trabalho.

1.4.2.1 Curvas de Polarização Experimentais

De acordo com Wolynec [34], as curvas de polarização são obtidas quando um metal é imposto a um potencial diferente do potencial de corrosão gerando as curvas experimentais que representam a relação entre o potencial de eletrodo aplicado e a corrente correspondente medida no potenciostato.

O potenciostato é uma fonte externa de potencial e permite um controle adequado do potencial desejado do eletrodo com relação ao eletrodo de referência, pois suas extremidades são conectadas diretamente aos terminais do potenciostato, sendo possível a medição do potencial de corrosão o qual ocorre quando este potencial atinge estabilidade, é possível medir a corrente de polarização e registrá-la em função do potencial por meio de um registrador. [32].

A Figura 19 ilustra esquematicamente um arranjo para o levantamento dessas curvas de polarização com os equipamentos básicos necessários para a obtenção dos dados: um potenciostato (para variar o potencial), um eletrodo de referência, responsável pela medição do potencial de corrosão, um eletrodo auxiliar (contra-eletrodo), o qual serve para completar a célula eletroquímica e um eletrodo de trabalho, além de um aquisitor de dados (registrador) [35].

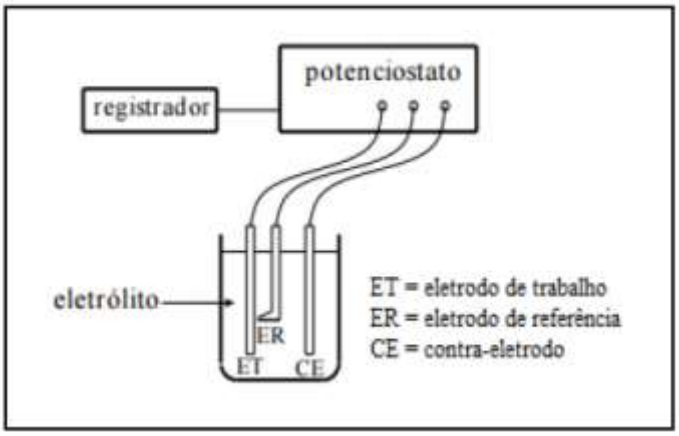


Figura 19: Arranjo esquemático para levantamento de curvas de polarização [34]

A polarização de um eletrodo através de um potenciostato conduz ao levantamento de uma curva de polarização que não é mais representativa da polarização de uma única reação e sim do efeito global de todas as reações que ocorrem simultaneamente sobre o eletrodo [34].

A polarização e passivação assumem grande importância na cinética dos processos de corrosão eletroquímica e particularmente para a proteção catódica, que consiste essencialmente na polarização catódica da estrutura a proteger [6].

Cada valor do potencial imposto é necessário que o sistema demande certa corrente que é suprida pelo próprio potenciostato. Informações como densidade de corrente de corrosão (Icorr) , coeficientes anódicos (ba) e catódicos (bc) de Tafel, mecanismos de

dissolução do metal e de redução da espécie catódica são importantes parâmetros do mecanismo do eletrodo no eletrólito que são obtidas por meio das curvas de polarização.

1.4.2.2 Curva Tafel

As curvas de polarização linear, são utilizadas com o objetivo de verificar o comportamento eletroquímico de um metal exposto a um potencial diferente do potencial de equilíbrio. Sendo assim, o potenciostato impõe um potencial ao eletrodo de trabalho em relação ao eletrodo de referência e registra a corrente de polarização relacionada a cada potencial.

O processo de polarização de Tafel é um processo no qual a corrosão é controlada por ativação, ou seja, controlado o quão rápido o metal é capaz de realizar a transferência dos elétrons para o eletrólito [32].

Através dessa técnica é possível medir a densidade de corrente de corrosão (I_{corr}), sendo possível o cálculo da taxa de corrosão. A curva Tafel (Figura 20), pode fornecer a I_{corr} e as constantes de Tafel β_a e β_c.

Como vantagem desse método pode-se citar que além da taxa de corrosão, permite determinar também as retas de Tafel, os parâmetros β_a e β_c. Deste modo se a inclinação da reta anódica for θ e da catódica γ então $\beta_a = tg\ \theta$ e $\beta_c = tg\ \gamma$ [34].

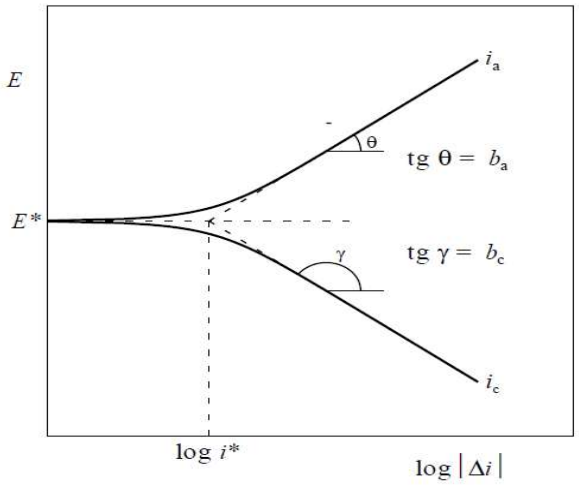
Para utilizar esse método é essencial que possa ser utilizado um conjunto de valores experimentais de potencial e corrente que quando plotado num gráfico determine ao menos uma reta bem definida, o que nem sempre ocorre, sendo necessário utilizar técnicas de ajuste.

O método de extrapolação da reta Tafel tem sido utilizado na determinação da taxa de corrosão de ferro comercialmente puros em diversos meios ácidos. Portanto, seu emprego para medir a taxa de corrosão de aços-carbono, que apresentam nesses meios uma taxa de corrosão maior, tem sido limitado, pois não é possível obter trechos lineares definidos.

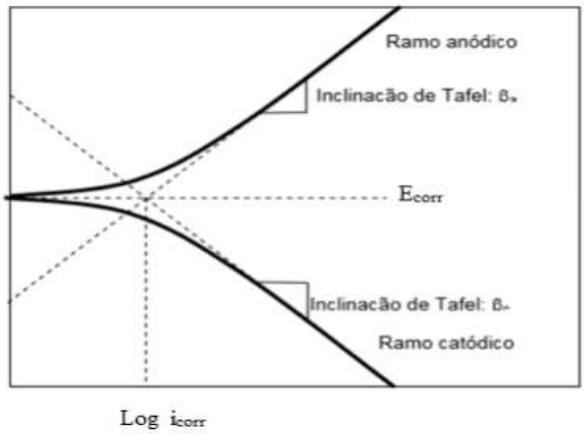
A falta de um trecho linear bem definido na curva de polarização ocorre devido a [34]:

- Adsorção específica;
- Polarização de concentração;
- Queda ôhmica.

Quando uma das duas primeiras causas é responsável, pouco pode ser feito para utilizar o método. Porém, se a causa for que ôhmica, o problema pode ser controlado através de técnicas experimentais existentes para a compensação dessa queda [34].



(a)



(b)

Figura 20- (a) Extrapolação da reta Tafel [31] e (b) Gráfico Tafel [36]

1.5 Análise AFM

O ensaio AFM (Microscópio de Força Atômica), possui a capacidade de gerar imagens com resolução atômica, proporcionando o estudo da morfologia da superfície, condutoras ou não, em escalas nanométricas.

Possui vantagens como a não necessidade de preparação da amostra para execução do ensaio, boa resolução, imagens em três dimensões, permite a quantificação direta da rugosidade da amostra e uma limitação é com relação ao tamanho da amostra devido ao porta amostras. Características como rugosidade, inclinação das imperfeições, máximo/ mínimo

valores da inclinação, dentre outros são possíveis de serem analisados através deste método [37].

O princípio do funcionamento é a varredura da superfície da amostra através de uma ponta piramidal de comprimento entre 100 a 200 μm integrada em um cantilever flexível. A força existente entre a ponta e a superfície da amostra faz com que o cantilever se aproxime ou se afaste. Na parte superior da haste há um espelho que reflete a luz de um feixe de laser [38].

Durante a varredura, para a verificação da morfologia da superfície os átomos existentes na ponta do AFM interagem com os átomos existentes na superfície da amostra. Durante a varredura a haste sofre deflexões devido a interação atômica, desviando o laser que incide sobre ele. Fatores como sujeira na amostra, umidade do ar, materiais que compõem as amostras e a ponta (cantilever) interferem na interação da ponta com o substrato [38].

De acordo com a Figura 21, a técnica AFM pode ser operada dos três modos apresentados. O modo com contato, o cantilever é mantido muito próximo da superfície da amostra e a força interatômica entre a ponta e a amostra é repulsiva. Sendo assim, a ponta possui um leve contato com a amostra produzindo imagens de alta resolução, mas a compressão e as forças geradas, entre a ponta e a superfície, podem acarretar em danos a amostra. O modo sem contato, o cantilever é mantido distante da superfície da amostra e a força interatômica entre a ponta e a amostra é muito baixa.

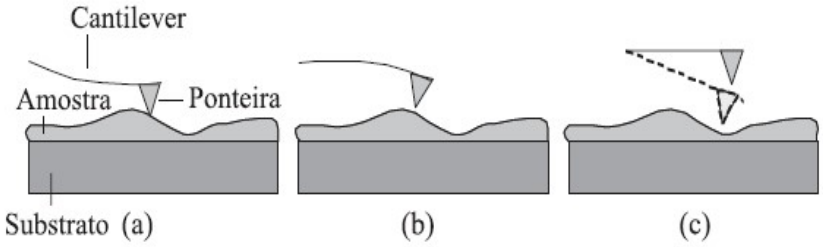


Figura 21- Análise AFM em suas três condições (a) com contato (b) sem contato (c) intermitente [39]

O modo sem contato contém a vantagem sob o modo com contato, pois não sofre os efeitos do atrito da amostra causada pela ponta. Portanto, o modo não contato não possui esse problema, mas não tem encontrado aplicabilidade geral, devido à instabilidade entre a

ponta e as forças adesivas da superfície e a resolução reduzida pela distância ponta-amostra que é relativamente grande.

O modo contato intermitente é similar ao sem contato, exceto devido ao fato de que a ponta se permanece vibrante e fica mais próximo da amostra, de forma que possua um contato intermitente que é utilizado para amenizar as limitações impostas pelo modo de contato [39].

Dentre as informações obtidas pela Análise AFM, está a Rugosidade média, parâmetro importante para definir a aderência do substrato a aspersão. A Rugosidade poder ser obtida através de um jateamento abrasivo ou usinagem [40].

Uma superfície que possui elevada rugosidade contém maior área de contato superficial do que as superfícies que não possuem tratamento, pois as partículas são aderidas mais facilmente, em que há mais pontos de ancoramento mecânico devido a área de contato ou zona ativa [41].

Em geral, a rugosidade superficial adequada para a maioria dos revestimentos apresenta uma Rugosidade Média entre 2,5 à 13 μm. Para um revestimento com espessura de camada menor os valores de rugosidade deverão ser menores 1,3 μm. Para revestimentos de plásticos em metais ou ligas de baixo ponto de fusão, como zinco, a rugosidade média recomendada é de no máximo 6 μm [18].

2. Metodologia

Neste capítulo serão detalhados os procedimentos experimentais realizados nas amostras que foram revestidas pela Aspersão Térmica e posteriormente aplicado o selante de Copolímero e outra amostra com Resina Epóxi. As amostras foram produzidas pela empresa VGK Engenharia.

Foram geradas três condições diferentes para que fossem testadas experimentalmente. Foram realizados os seguintes procedimentos: Análise AFM, Ensaio de Polarização Eletroquímica, Microscopia Ótica (MO), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), e microdureza.

2.1 Característica do Material e do Revestimento

O material utilizado como substrato foi o Aço Carbono SAE 1020, em que a composição química está estabelecida na Tabela 5 e o teor especificado por norma está contido na SAE J-403. É um dos aços mais utilizados no mercado pois possui alta tenacidade e baixa dureza, fácil usinagem, soldabilidade, podendo ser soldado por qualquer processo a gás, arco ou resistência [9].

Tabela 5: Composição química do Substrato.

Elementos Químicos	Teor Analisado	Teor Especificado por Norma SAE J-43
Carbono	0,18-0,23%	0,18-0,23%
Manganês	0,6%	0,3-0,6%
Fósforo	0,03%	0,03%
Enxofre	0,05%	0,05%

Antes da deposição do revestimento o substrato teve sua superfície tratada através do jateamento abrasivo com óxido de alumínio G.20, com o objetivo de remover os contaminantes e fornecer texturização da superfície. O processo de aspersão térmica por arco elétrico foi utilizado para depositar o revestimento no substrato, com arame que em sua composição havia um material ferroso em que a composição química possui como objetivo aumentar a resistência a corrosão devido a presença de Cr (basicamente uma liga Cr-Ni-Mn) [9].

Na Tabela 6, será apresentada a composição dos arames utilizados no processo de Arco Elétrico.

Tabela 6: Composição dos arames no processo de Aspersão a Arco Elétrico

[Fonte: Empresa VGK Engenharia]

Elementos Químicos	**Teor**
Carbono	0,3%
Manganês	1%
Níquel	1%
Cromo	12 – 14%
Silício	0,08%
Ferro	Balanceado

As propriedades físicas dos arames serviram de base para controle dos parâmetros contidos no processo, para que o revestimento tenha propriedades físicas próximas as do arame.

Propriedades Físicas dos arames: [9]

- Diâmetro – 1,6 mm
- Eficiência no depósito – 78%
- Ponto de Fusão – 1427 ^{0}C
- Resistência de cisalhamento – 32,6 MPa
- Texturização – 0,15 – 0,4 µm
- Dureza – R $_{15n}$ 80-82 (HRc 40-43)
- Densidade – 6,74 kg/m^{3}
- Coeficiente de Expansão Térmica – 17,4 x 10^{-6} ^{0}C^{-1}

2.1.1 Corpos de Prova

Foram confeccionadas 2 placas para serem revestidas e posteriormente seladas, com dimensões de acordo com a Tabela 6. No revestimento a placa deve ser fixada e o operador conduz a alimentação do arame automaticamente, com o objetivo de manter a taxa do fluxo do spray constante. Concomitantemente, ele controla o posicionamento da pistola em movimentos *zig-zag* horizontalmente. Deste modo, a superfície da placa recebeu as partículas aspergidas uniformemente conforme ilustrado na Figura 22. A espessura do revestimento ficou em torno de 1 mm medido através do paquímetro.



Figura 22: Aspersão por Arco Elétrico para revestimento das Placas [9]

Duas placas foram produzidas, e ambas receberam uma aplicação de Resina Epóxi, com o objetivo de proteger as laterais da amostra da ação corrosiva do meio (em azul). Essa aplicação ocorreu após a deposição do revestimento, Figura 23[9].

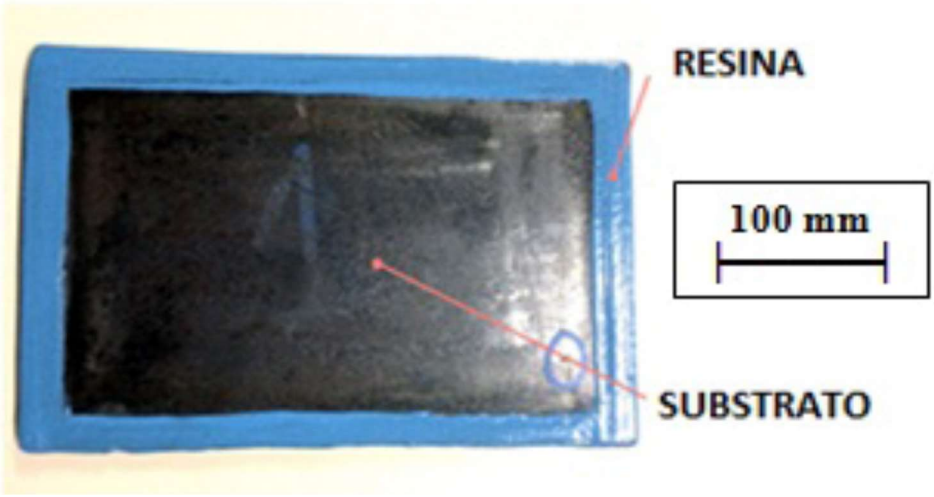


Figura 23: Placa com aplicação de resina.

Durante o processo do revestimento, a pressão do jato foi mantida alta, na faixa de 40 psi, com o objetivo de obter camadas de revestimento com fina texturização, sabe-se que se utilizar uma pressão mais baixa haverá uma texturização áspera. Nas últimas camadas do revestimento a pressão foi aumentada para 60 psi com a finalidade de aumentar a dureza [9].

A força de impacto das partículas aspergidas foi mantida em 60 N para assim formar uma camada de revestimento de aproximadamente 1 mm de espessura, a pistola era manuseada pelo operado enquanto a placa permanecia fixa. Na Figura 24 observa-se a placa com uma camada de revestimento [9].



Figura 24 - Placa com aplicação de uma camada de revestimento

Na Tabela 7, consta as especificações das placas:

Tabela 7: Especificações das Placas [9]

Medida Base	Acabamento	Selante
100 mm X 150 mm X 4,5 mm	Resina Epóxi	Selante 1
100 mm X 150 mm X 4,5 mm	Resina Epóxi	Selante 2

A aplicação do selante foi realizada após os corpos de prova terem sido revestidos e resfriados em temperatura ambiente. A aplicação com os diferentes tipos de selantes tem por objetivo analisar as particularidades de cada selante. Pois, é esperado que com um preenchimento melhor dos poros pelo selante, a porosidade irá reduzir, resultando em um balanceamento entre o aumento da resistência a corrosão e aumento da dureza [9].

Na Figura 25, observa-se uma diferença visual na superfície da placa, sendo possível visualizar a área que está com selante e a área sem o mesmo.

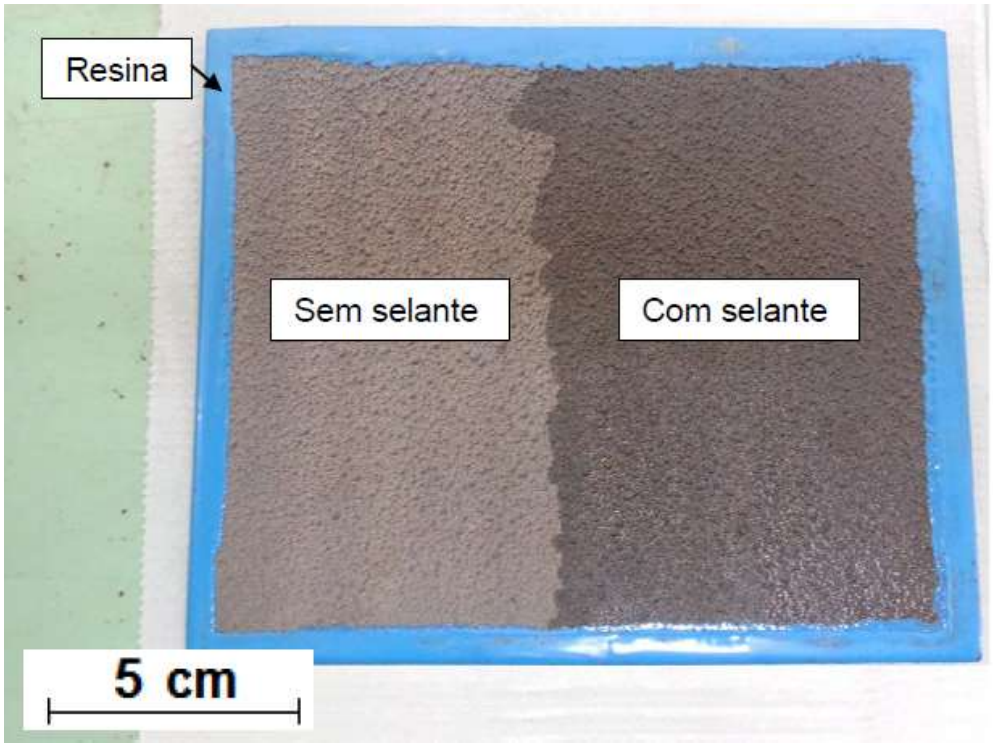


Figura 25- Amostra com e sem aplicação de selante.

Selante 1:

- Composição: Tinta em dois componentes, a base de Resina Epóxi Curada com Poliamida.
- Características Físicas e Químicas: Massa específica a 25^0C: 1,45 g/cm^3; sólidos por volume: 51%; Ponto de Fulgor: 26^0C; Aspecto da Película: semibrilhante [9].

Selante 2:

- Composição: Copolímeros em meios solventes orgânicos; Componentes: Butanona (19,5%), Etila acetato (27,5%); Acetona (44%);
- Características Físicas e Químicas: Pressão a vapor: 233 Mbar; Densidade: 0,85 g/cm^3; Ponto de Ebulição: 56^0C; Viscosidade: 13s (4 mm); Temperatura de inflamação: 460^0C [9].

Os dois selantes aplicados, com composição e características diferentes, deve-se a necessidade de verificar como as particularidades de cada selante podem afetar no aumento de resistência a corrosão e a dureza.

O selante 1 foi catalizado na proporção recomendada pelo fabricante e diluído com adição de 30% do volume de solvente, reduzindo a viscosidade original para uma maior penetração e o método de aplicação foi por pincelamento contínuo em temperatura ambiente. O selante 2, não houve necessidade de diluição e o método de aplicação foi também por pincelamento contínuo em temperatura ambiente [9].

2.1.2 Preparação das Amostras para microscopia

Da placa original foram retiradas duas amostras de cada tipo, ou seja, duas amostras sem selante, com selante 1 e selante 2. Isso ocorreu devido a necessidade de a corrosão eletroquímica precisar de uma amostra de cada tipo, garantindo assim que nenhuma característica da amostra tivesse sido alterada. E a outra amostra para os demais processos relacionados nesse trabalho, MEV, MO, análise AFM e microdureza. Na Figura 26, estão as amostras após o processo de corte.

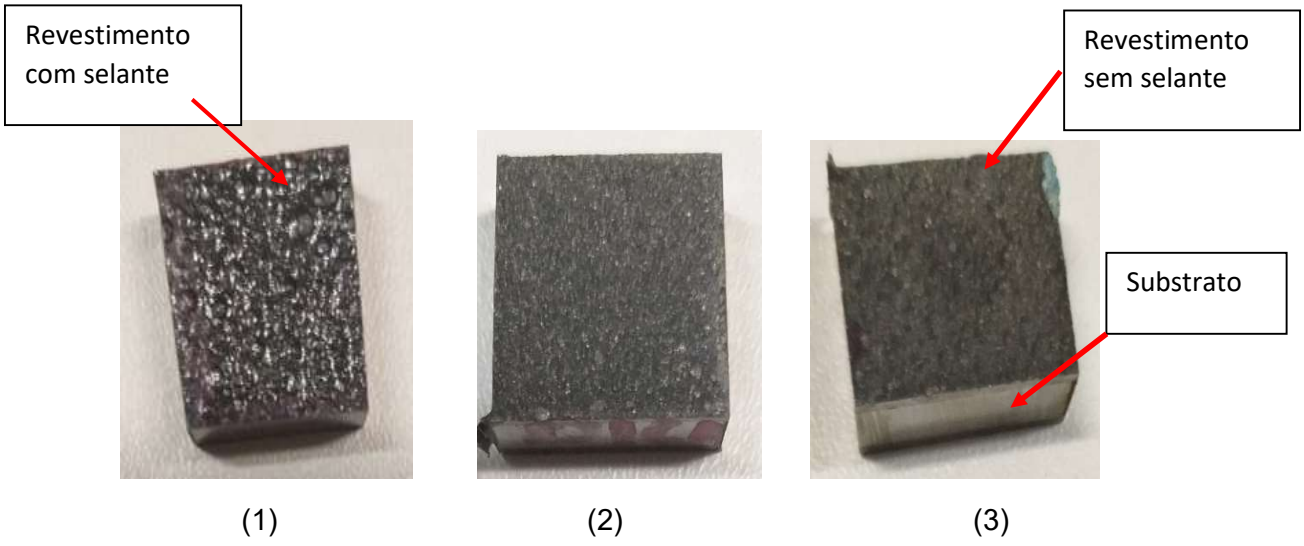


Figura 26- (1) Amostra com Selante 1 (superfície mais brilhosa); (2) Amostra com Selante 2; (3) Amostra sem Selante

2.2 Preparação metalográfica das Amostras

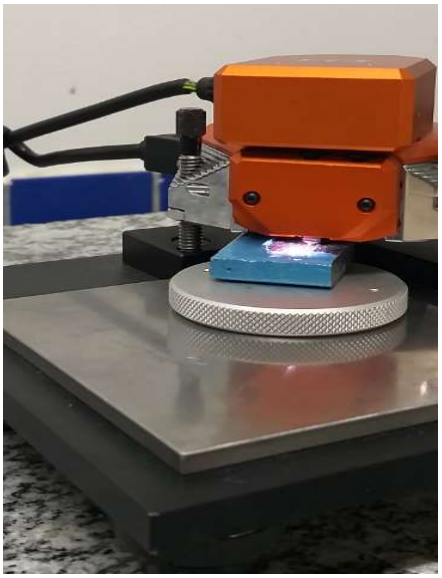
As amostras foram cortadas em forma de quadrado com tamanho de 5mm, através da máquina de corte do laboratório do CEFET/RJ, onde o disco possui capacidade de corte para amostras com dureza na faixa de 35 à 50 HRc. Após o processo de corte, uma amostra de cada foi para o processo de corrosão eletroquímica, não necessitando passar por mais nenhuma preparação. As outras amostras, necessitaram ser embutidas, lixadas e polidas para obter uma maior acurácia de informações no Microscópio Ótico e Eletrônico de varredura, não foi necessário utilizar ataque químico para revelar as microestrutruras.

O embutimento foi realizado na máquina Arotec, modelo PRE-30, do laboratório do CEFET/RJ. O objetivo desse processo é de oferecer a amostra uma maior estabilidade para a execução dos processos lixamento e polimento. Após foram realizados os acabamentos superficiais através do lixamento e após o polimento. As lixas utilizadas foram na ordem decrescente de granulometria, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 1200, ou seja, da mais áspera para a mais fina. Por fim, foi realizado o polimento com pano de 6 μm, 3 μm e 1 μm, utilizando pasta de diamante como abrasivo. Todo o processo de lixamento e polimento foi realizado pelo equipamento Aratec Aropol 2V.

2.3 Análise AFM (Análise do Microscópio de Força Atômica)

O equipamento utilizado, conforme demonstrado nas Figuras 25 e 26, é um equipamento Nanosurf EasyScan 2 AFM, Versão 1.6, conectado ao programa Easy Scan 2 para visualizar e analisar os resultados [41].

As amostras foram analisadas nas seguintes situações: Com aspersão térmica sem aplicação de selante e aspersão térmica com aplicação dos dois selantes diferentes.





(1) (2)

Espuma utilizada para evitar que qualquer vibração interfira no ensaio. Objetivo de isolamento.

Figura 27- (1) Ensaio AFM; (2) Base do Equipamento
Fonte: A autora

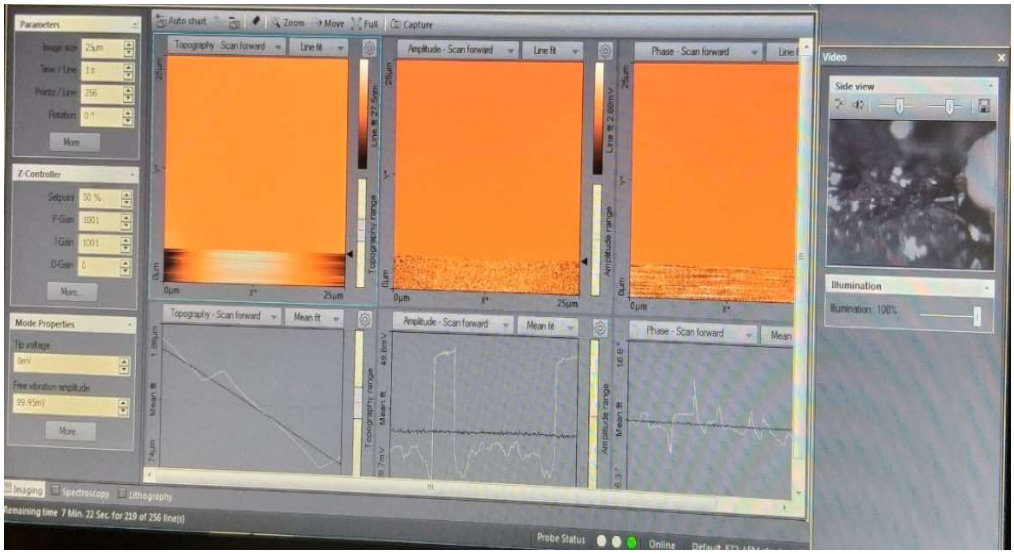


Figura 28- Imagem do programa Easy Scan 2

Enquanto ocorre a varredura na amostra, os átomos da ponta do AFM interagem com os átomos da superfície da amostra e, dependendo da distância entre a ponta e a amostra as interações podem ser atrativas ou repulsivas, conforme descrito na revisão bibliográfica.

O suporte que sustenta a ponta do AFM é o cantilever, também conhecido como haste, e pode possuir a forma “V” ou o formato retangular. Durante a execução da varredura o

cantilever sofre deflexões devido à interação ponta-amostra. Quando as forças na região são atrativas o suporte se curva na direção da amostra e quando as forças são repulsivas, ele se curva na direção contrária [38].

2.4 Ensaio de Polarização Eletroquímica

Para realização dos ensaios de polarização eletroquímica foi utilizado um potenciostato galvanostato Autolab modelo PGSTAT204, acoplado a um computador e controlado pelo software Nova 1.10, pertencente ao Laboratório de Materiais (LAMAT) do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), conforme apresentado na Figura 29. O software fornece as curvas e os dados da variação do potencial e da corrente. Esses dados foram tratados, de modo a obter a densidade de corrente e o potencial de corrosão. A célula eletroquímica empregada consiste de um eletrodo de trabalho, um contra eletrodo de platina e um eletrodo de referência de calomelano saturado (Figura 30).

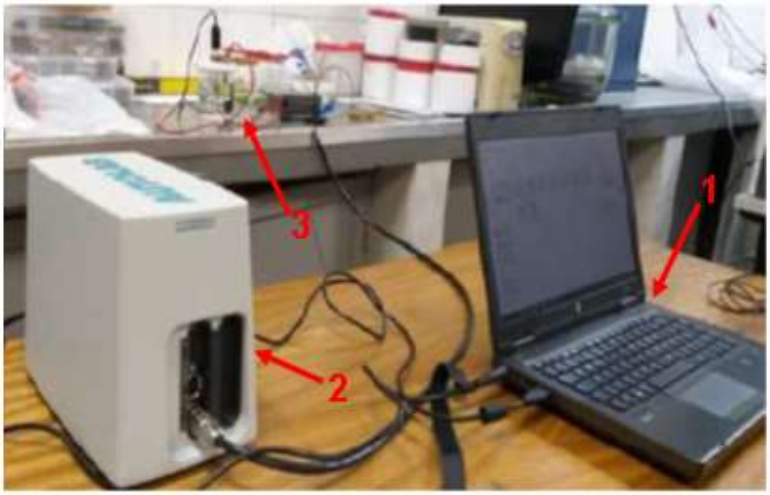


Figura 29: Aparato do ensaio de polarização eletroquímica. 1 – Computador para tratamento de dados, 2 – Potenciostato, 3 – Célula eletroquímica.

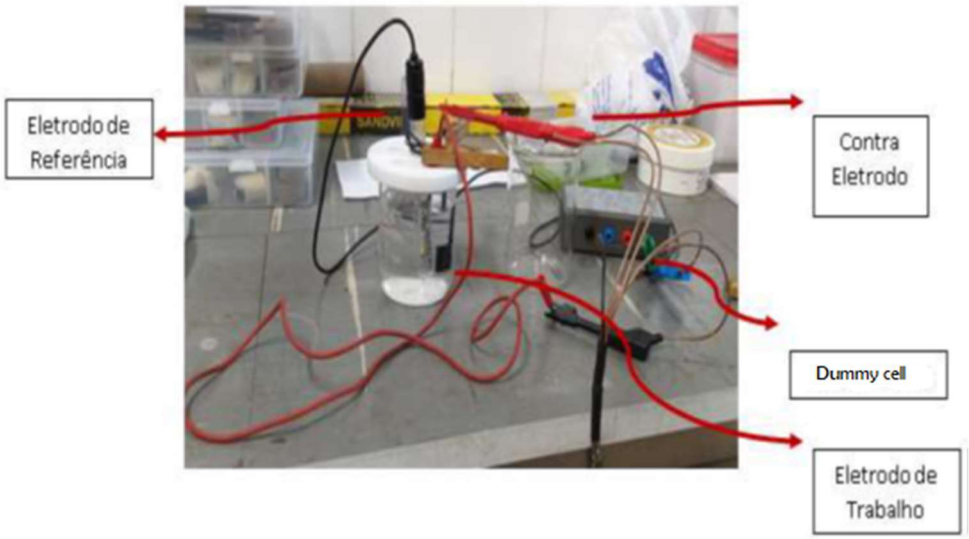
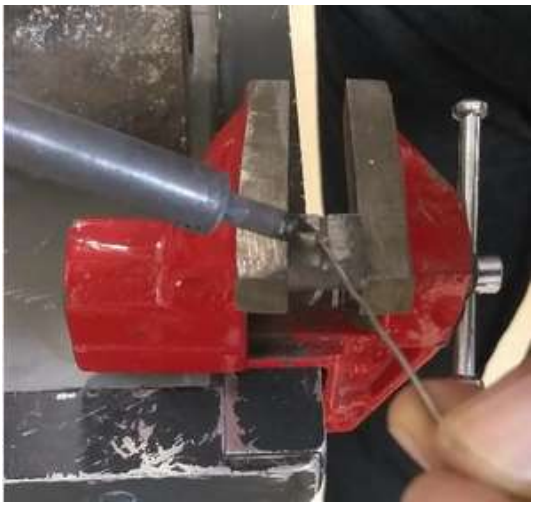


Figura 30: Célula eletroquímica

Os eletrodos de trabalho foram preparados utilizando uma amostra de cada condição analisada. Para realizar o ensaio as amostras não foram lixadas ou passadas por algum outro processo que provoque alterações das características da aspersão ou do selante. Foi aberta uma ranhura com a serra e soldado o fio na amostra. Com o objetivo de melhorar a aderência de fixação do fio na amostra foi utilizada solda estanho (Figura 31).



(1)



(2)



(3)

Figura 31- Processo de soldagem do fio na amostra (1) Rasgo (2) Solda do fio na amostra (3) amostra pronta com o fio condutor

Após a fixação do fio foi realizado isolamento da amostra com isolante líquido, Figura 32. O isolamento ocorreu onde foi fixado o fio e nas laterais da amostra, com o objetivo de impermeabilizar essas regiões, deixando exposta só a superfície da amostra que sofreu a ação da aspersão e do selante. Sendo assim, a solução que foi inserida a amostra só teve acesso a uma área de 0,5 cm^2.



(1)



(2)

Figura 32 - (1) Amostras após aplicação de isolante líquido, (2) Isolante líquido utilizado

A célula eletroquímica foi mergulhada em uma solução de 3,5 % (% em massa) de cloreto de sódio (NaCl) a temperatura de 25°. Para obtenção das curvas de polarização anódica e catódica foi necessário estabilizar o potencial de circuito aberto (E_{PCA}) do eletrodo de trabalho em cada ensaio. O tempo fixado para a estabilização do sistema em cada ensaio foi de 20 minutos. A partir do E_{PCA} foram levantadas as curvas de polarização anódica e catódica, para valores mais positivos (anódicas) ou mais negativos (catódicas). O potencial inicial do ensaio foi de -300 mV e o final +300 mV. A velocidade de varredura utilizada no ensaio foi de 1 mV/s.

2.5 Microscopia Ótica (MO)

A Microscopia Ótica foi realizada após o revestimento das amostras, embutidas em baquelite, lixadas e polidas, e o processo ocorreu no LAMAT (laboratório de materiais) no CEFET/RJ. O Equipamento utilizado foi da Olympus modelo BX60MF, permitindo a análise das micrografias retiradas. O objetivo é analisar as imperfeições contidas nas amostras. Os aumentos utilizados foram de 12,5x (vezes), 500x e 100x para as amostras seladas com o objetivo de visualizar a penetração do selante e 12,5x, 500x para a amostra sem selante.

2.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura permite, além de fazer análise microestrutural com mais precisão, verifica os elementos de liga presentes, através do EDS (Energy Dispersive Spectrocopy), obtendo uma análise dos elementos químicos presentes, ele é acoplado ao MEV através do dispositivo marca Bruker Quantax EDS com detectores XFlash 6. A MEV foi realizada no LAMAT do CEFET/RJ e o modelo é 688A – 1S-Cambridge 20kv. Foi realizada análise na amostra selada com Resina Epóxi e com Copolímero.

2.7 Microdureza

Com o objetivo de definir a dureza do revestimento foi realizado o Ensaio de Microdureza Vickers, através do equipamento Microdurômetro do Modelo 422 MVD, através da norma NBR NM ISSO 6507-1, 06/2019.

As medições ocorrem na seção transversal das amostras e serão realizadas medições para cada um dos modelos revestidos e embutidos em baquelite, com uma carga de 300 gr, em diferentes pontos do revestimento, substrato e interface.

Os ensaios de Microdureza Vickers foram realizados nos 3 tipos de amostras: com selante de Resina Epóxi, Selante de Copolímero e Sem Selante. Em cada amostra foram realizadas 18 medições, sendo que 6 na extremidade direita, 6 no meio e 6 na extremidade esquerda. Cada linha de 6 de medição foram divididas em 3 medições no revestimento, 1 na interface e 2 no substrato. Na Figura 33 foi montado um esquema para melhor visualização.

No ensaio de Microdureza foi utilizado o método estatísitico Anova, com o teste F, com o objetivo de analisar as discrepâncias entre as médias.

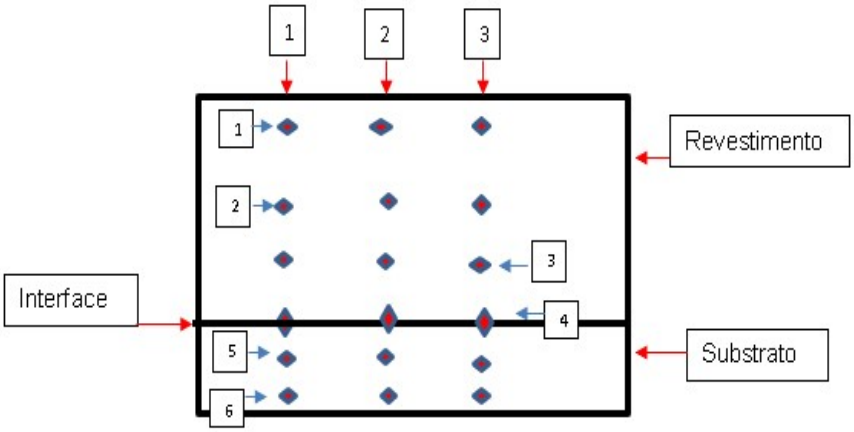


Figura 33 - Distribuição das 6 Identações no ensaio de microdureza.

3. Resultados e Discussão

3.1 Microscopia Ótica

De acordo com as micrografias, Figuras 34 a 42, é possível analisar a microestrutura formada no revestimento com o objetivo de identificar as inclusões metálicas e não metálicas, o aspecto dos poros, microestruturas e a estrutura lamelar, caracterizando um material heterogêneo [9].

A microscopia ótica foi realizada nas três amostras. Sem selante, com selante de copolímero e selante de resina epóxi. A parte escura das imagens é a baquelite e a parte lisa é o substrato do material.

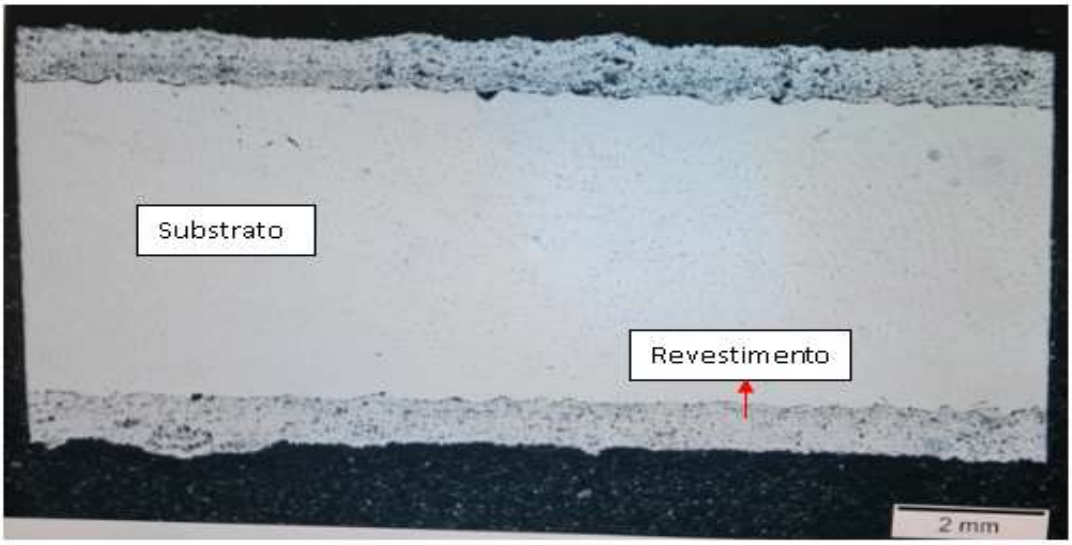


Figura 34- Amostra do material com selante de Resina epóxi. Aumento de 12,5x

Nessa imagem é possível visualizar, embora sem muitos detalhes, a existência de poros, óxidos, incrustações.



Figura 35 – Micrografia da amostra com selante de Resina Epóxi com aumento original de 100x

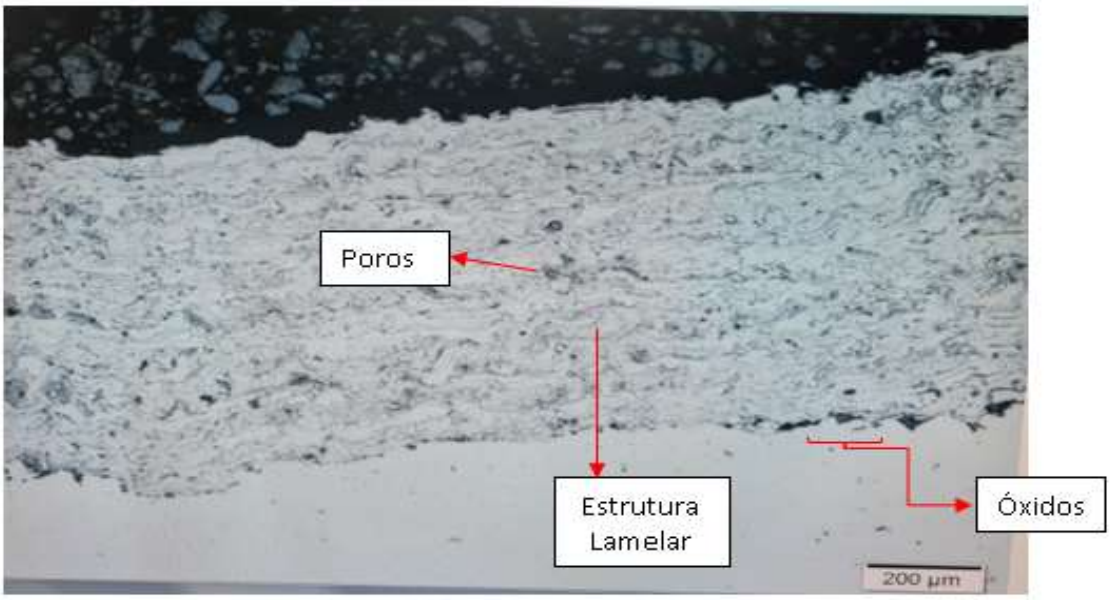


Figura 36 – Micrografia da amostra com selante de Resina Epóxi com aumento original de 100x

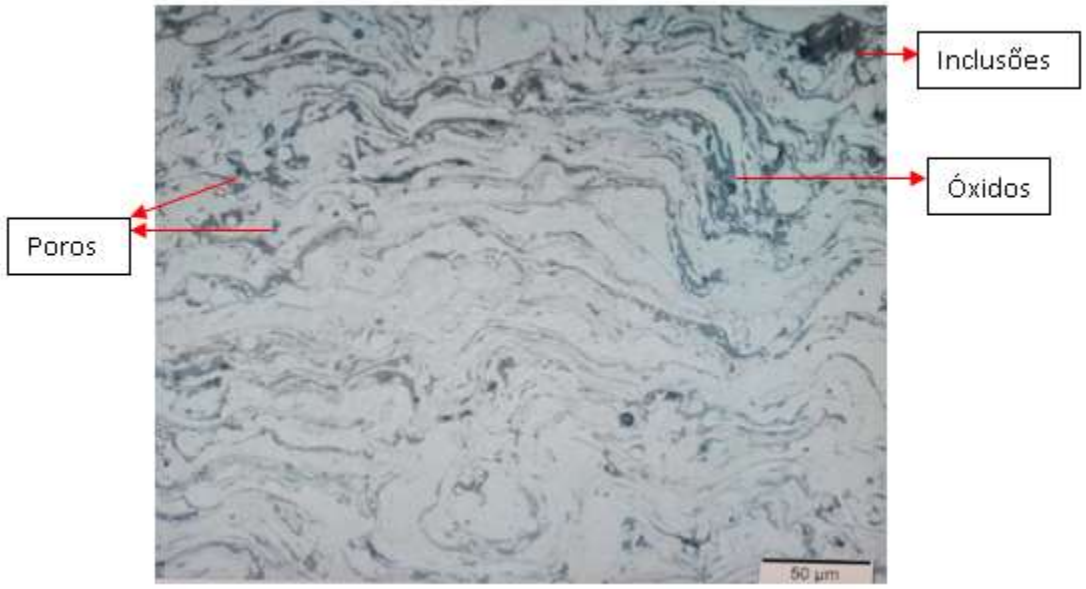


Figura 37 – Micrografia da amostra com selante de Resina Epóxi com aumento original de 500x

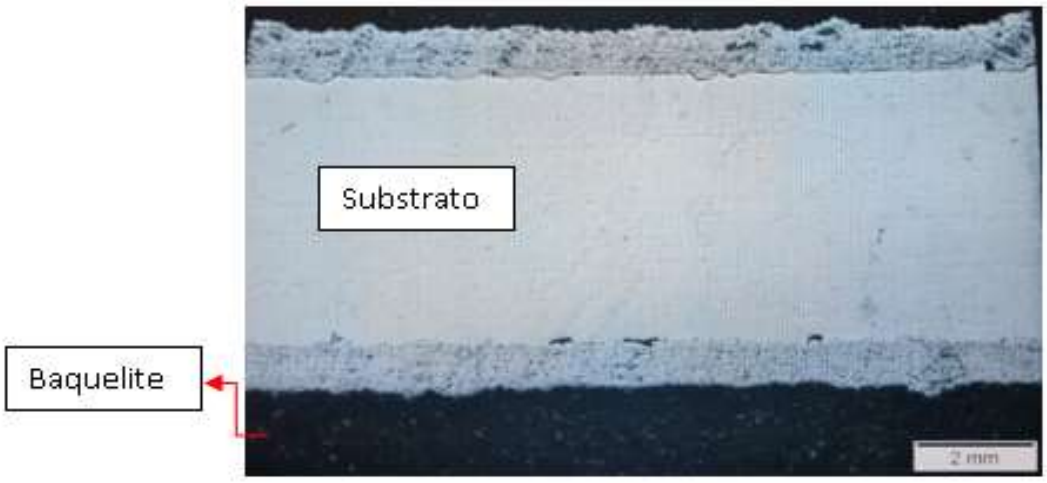


Figura 38 – Micrografia da amostra sem selante com aumento original de 12,5x



Figura 39 – Micrografia da amostra sem selante com aumento original de 500x

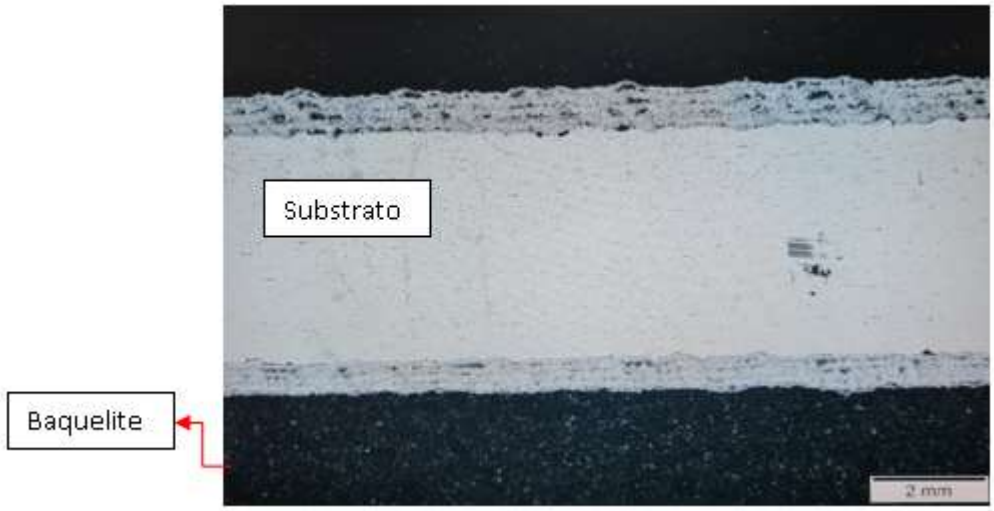


Figura 40 – Micrografia da amostra com selante de copolímero com aumento original de 12,5x



Figura 41 – Micrografia da amostra com selante de Copolímero com aumento original de 100x

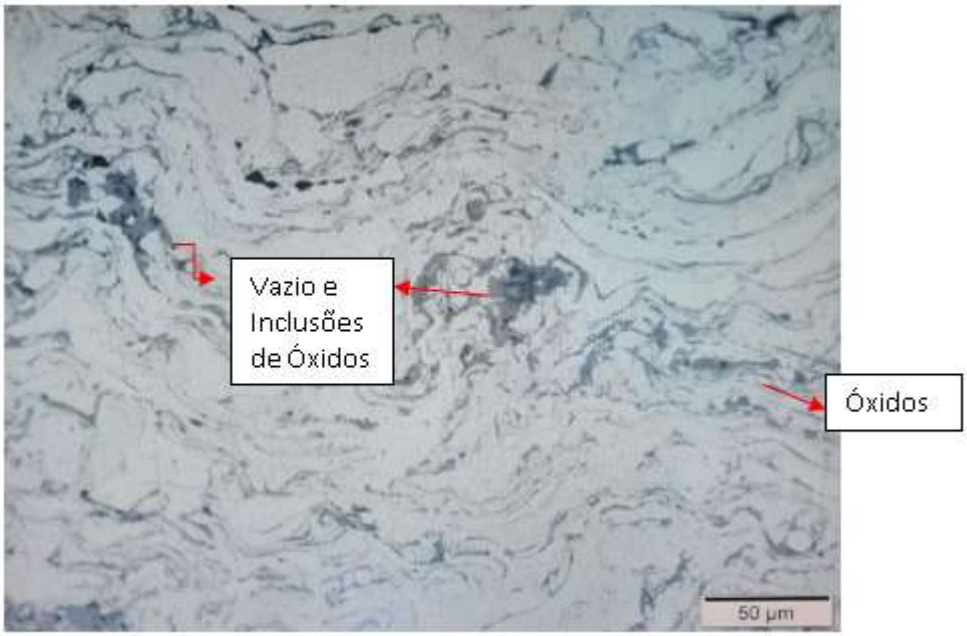


Figura 42 – Micrografia da amostra com selante de Copolímero com aumento original de 500x

De acordo com as análises das amostras de microscopia ótica, as lamelas estavam regulares, empilhadas em camadas do modo panqueca, homogêneas e espessas, além de

áreas acinzentadas, possivelmente de óxidos, Figuras 35 a 42. As superfícies mais escuras são vazios e as acinzentadas óxidos.

É possível observar porosidades de todos os tipos, nas amostras, Figuras 35 a 42. A análise de porosidade nas amostras é indiferente ao acabamento superficial e da presença de selante, pois a geometria do substrato influencia na presença de porosidade.

Os revestimentos aspergidos através da técnica do arco elétrico possuem lamelas mais espessas, de vários tamanhos e com uma maior quantidade de óxidos do que os revestimentos aspergidos por outras técnicas, sendo possível verificar em sua microestrutura, partículas ressolidificadas, antes que ocorra o impacto, estando de acordo com as micrografias apresentadas neste trabalho. Com o objetivo de melhorar a microestrutura, pode-se utilizar menores taxas de alimentação, arames com diâmetros menores, gases atomização inertes, redução da distância de aspersão e redução da voltagem do arco [8].

A formação de inclusões metálicas com aspecto de estrias escuras formadas em torno da estrutura lamelar ocorre devido a presença de Cr, sendo o tipo ideal de inclusão a ser formado quando se quer melhorar a resistência a corrosão, elementos como Ni, Si e Mn também podem estar presentes. No entanto, inclusões metálicas dos elementos S,P,O,H devem ser evitadas uma vez que afetam as propriedades mecânicas e fragilizam o revestimento. Existe a opção da inserção de desoxidantes através dos elementos Mn, Si e Al, porém eles também podem formar inclusões não metálicas com um formato de camadas alongadas claras e comprimento de até 100 Microns. Pinheiro [16] observa que se as inclusões forem capazes de se formar na região de partículas esferoidizadas, elas passarão a possuir um aspecto de ponto preto, composta majoritariamente por óxidos.

Nas micrografias é possível notar que os poros do tipo 3 são os mais comuns, como pode ser observado nas Figuras 35, 36, 37, 39 e 41. Sendo assim esse tipo de poro que possui como característica ser arredondado e menos grosseiro são mais frequentes quando, no impacto, as partículas aspergidas não estão completamente fundidas e assim não preenchem de modo correto os interstícios entre as partículas depositadas [8].

Para reduzir a porosidade em uma amostra no processo de aspersão por Arco Elétrico, sugere-se mantendo o controle do ângulo de aplicação em 90^0 e um limite inferior para o ângulo de 45^0, abaixo deste posicionamento também haverá o comprometimento de outras propriedades do revestimento facilitando a formação de microtrincas [16].

3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

Através da análise no MEV é possível identificar os principais elementos de liga presentes nas amostras existentes, assim como uma melhor visualização de microtrincas, porosidades e defeitos, que são de difícil avaliação pela Microscopia Ótica.

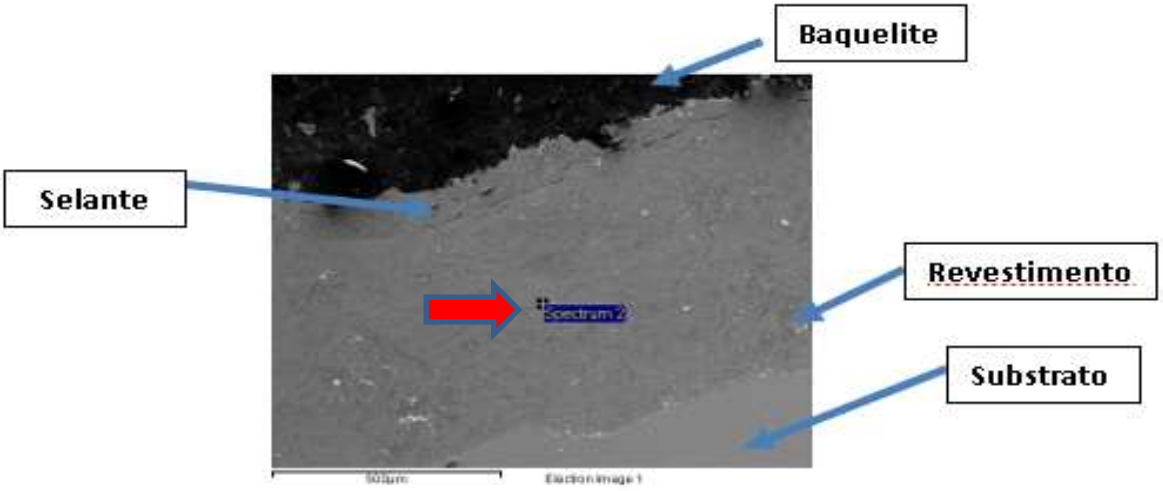
Os revestimentos apresentam uma morfologia de uma microestrutura lamelar ao longo do substrato, Figuras 46, 47, 48 e 54. Verifica-se também a formação de óxidos, devido a oxidação das partículas fundidas, que são mais evidentes quando comparada com as micrografias obtidas por MO. Os óxidos elevam a dureza do revestimento, de modo que, o excesso de óxidos no revestimento pode acarretar falha coesiva do revestimento, redução à resistência ao desgaste dos equipamentos mecânicos, devendo assim ter a sua quantidade limitada [42,43].

Terres [43] mostra que a presença de poros em todas as amostras é comum em todos os processos da aspersão térmica, devido as condições adversas sofridas pelas partículas durante a pulverização e ao impacto. A porosidade depende da velocidade da partícula, o ângulo de pulverização, temperatura e tamanho das partículas. Essas partículas quando não fundidas contribuem na criação dos espaços vazios, gerando os poros.

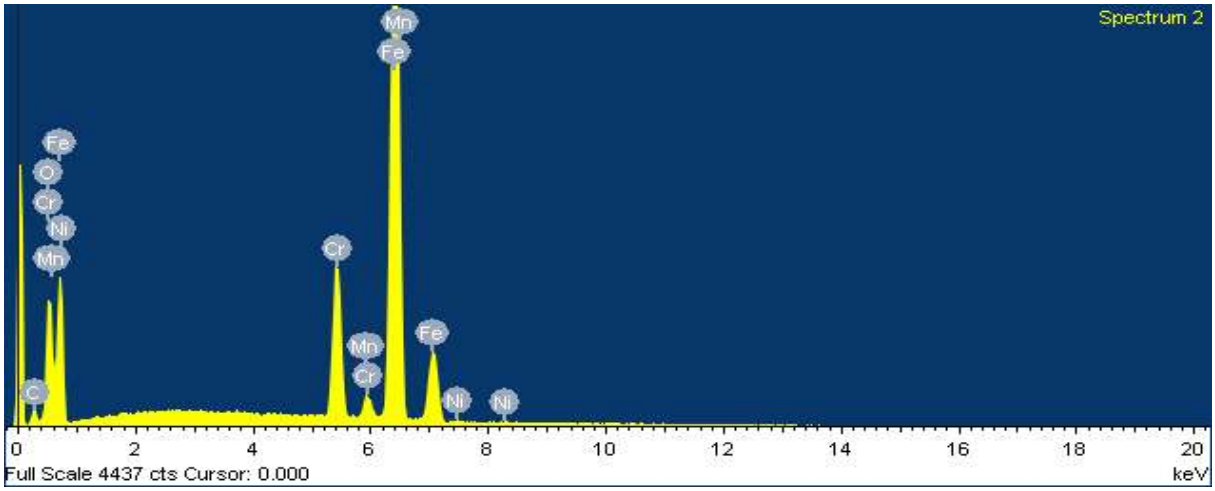
No MEV foram obtidas as micrografias para as condições seladas. Em que primeiro foi feito a análise do selante de Copolímero e após da Resina Epóxi, foi obtido a análise pontual e de linha através do EDS. Com o EDS é possível fazer análise, demonstrando os elementos de liga presentes e assim avaliá-los, a indicação dos elementos ocorreu de modo automático.

Condição 1: Placa com aplicação de selante com Copolímero.

Na Figura 43, no item b é possível visualizar os elementos contidos na área do Espectro 2, em que, encontram-se distribuídos de acordo com a posição que ocupam, este ponto foi escolhido de modo aleatório e está contido no revestimento, onde pode-se verificar quais os elementos de liga que se encontram em maior quantidade e assim definir as características desse revestimento. Esta análise pontual foi feita através de EDS.



(a)



(b)

Figura 43- Amostra com Selante de Copolímero (a) análise de ponto por EDS; (b) Espectro de EDS dos elementos do ponto.

De acordo com a Figura 43b, observa-se a presença dos elementos de liga ferro, oxigênio, cromo, níquel e manganês. Em que, o cromo, em quantidades suficientes, apresenta como característica o aumento de dureza e da resistência a corrosão do material, ele forma óxido com relativa facilidade e é utilizado para refinar grão e reduzir a incidência de trincas resultantes tensões e de corrosão sob tensão [9,44].

O Cromo é encontrado nos arames com valor entre 12 a 14% melhorando a resistência a corrosão, sendo o teor do elemento de até 12% há um aumento de resistência mecânica

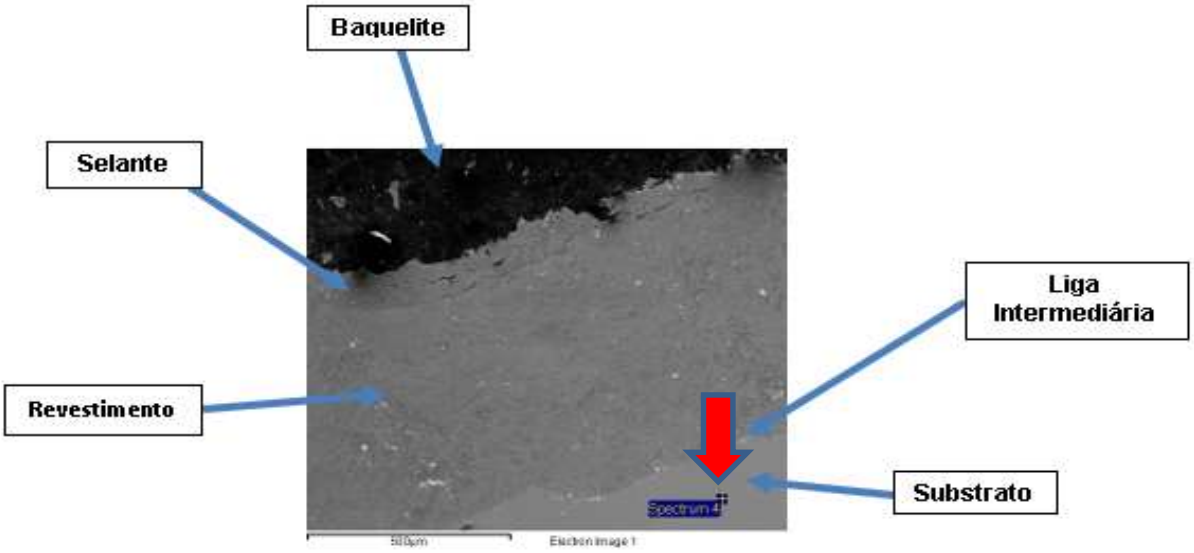
em temperaturas elevadas. O excesso desse item pode afetar propriedades mecânicas, usinabilidade, soldabilidade, ou aplicações que possuem determinadas exposições térmicas [14].

O níquel contribui para resistência a corrosão, porém sua eficácia é notada em quantidades de até 20%, aumentando assim a resistência a corrosão e a dureza [43].

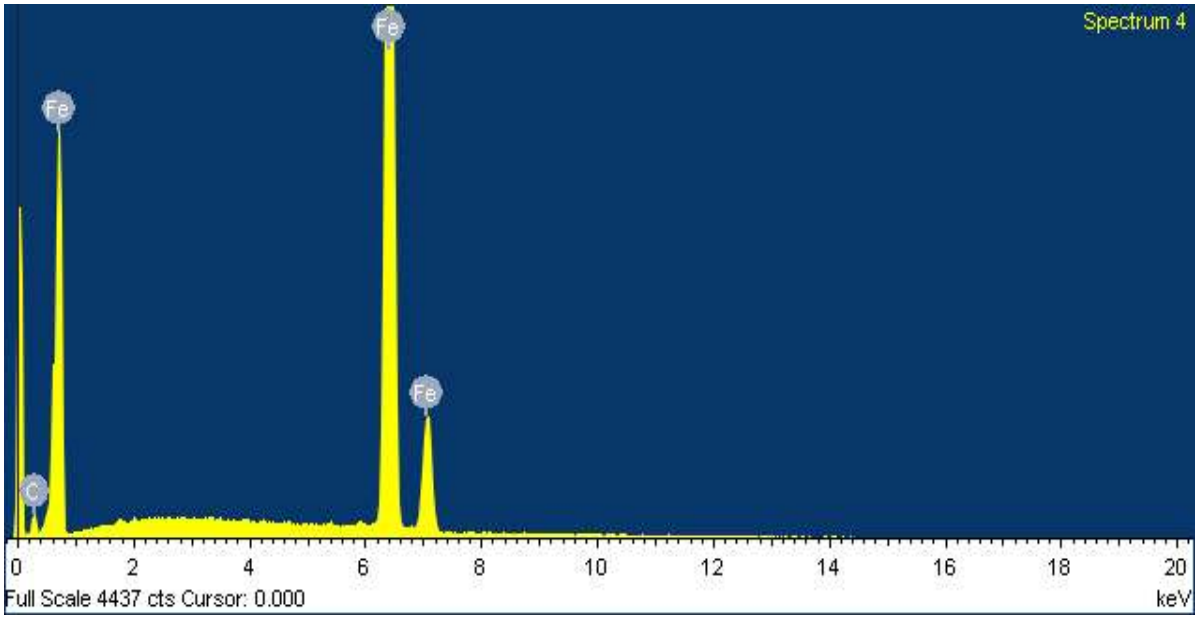
O manganês contribui para o aumento da resistência ao desgaste quando se encontra em quantidade inferior a 5%, formando inclusões metálicas. Ele em quantidades moderadas e em associação com adições de Ni, realiza muitas das funções do Níquel, como uma excelente resistência a corrosão. [18]

A composição química do arame contendo Cr, Ni e Mn possui como finalidade otimizar as propriedades mecânicas de um substrato. Sendo que, para que isso ocorra, esses elementos devem estar nas quantidades significativas para formar inclusões metálicas. Essas quantidades são: Cr até 12%; Ni com teor de 12 a 20% e Mn com teor inferior a 0,5% [16;42].

Na Figura 44, pode-se analisar os elementos do Espectro 4, que está no substrato logo abaixo da área aspergida.



(a)

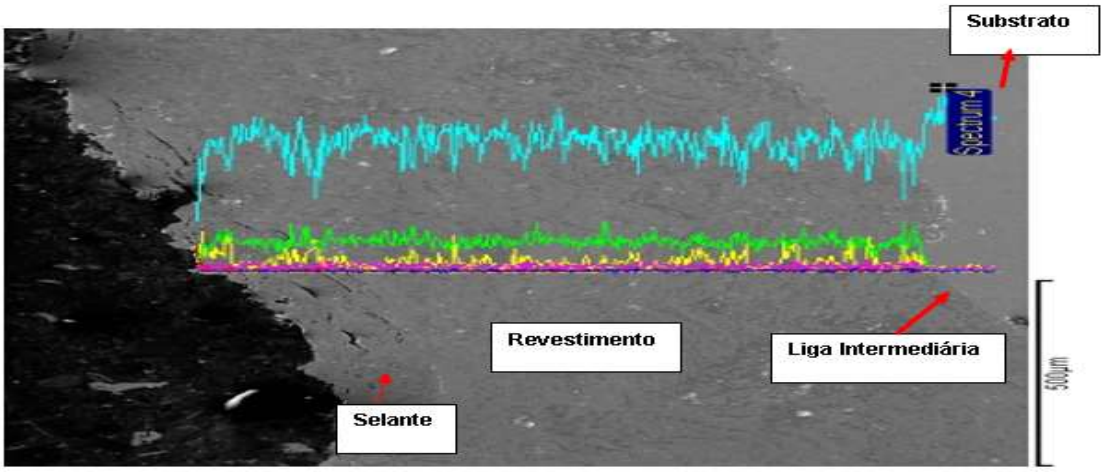


(b)

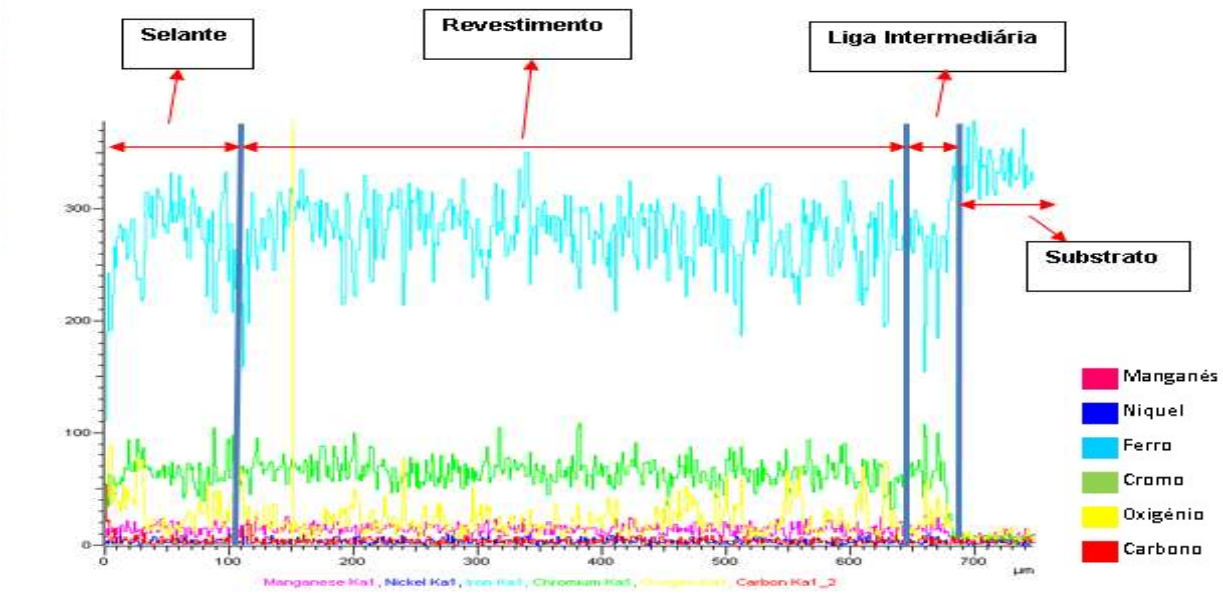
Figura 44- Amostra com Selante de Copolímero (a) análise de ponto por EDS; (b) Espectro de EDS dos elementos do ponto.

Observa-se somente uma grande quantidade Fe, demonstrando que o substrato não teve suas condições alteradas, que seria a presença dos elementos químicos no substrato, devido a aspersão.

Na Figura 45a, é apresentado a morfologia e o espectro EDS de linha da amostra na condição 1, em uma seção que contempla o substrato, liga intermediária, revestimento e selante. No gráfico (b) nesta mesma Figura, apresenta em detalhes o espectro EDS da morfologia da Figura (a). Sendo assim, é possível concluir que na condição 1 os componentes que predominam na área aspergida, ligas intermediária e selante são Fe, Cr, Ni, Mn e no substrato a composição química majoritária é basicamente formada por Fe.



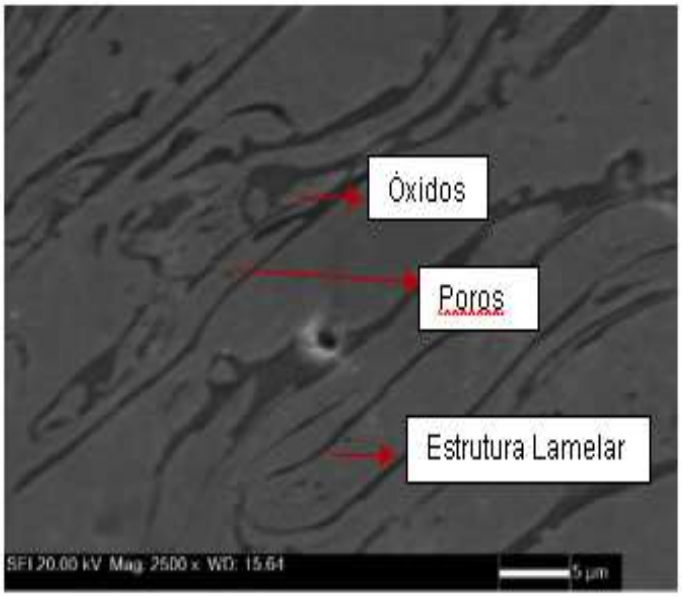
(a)



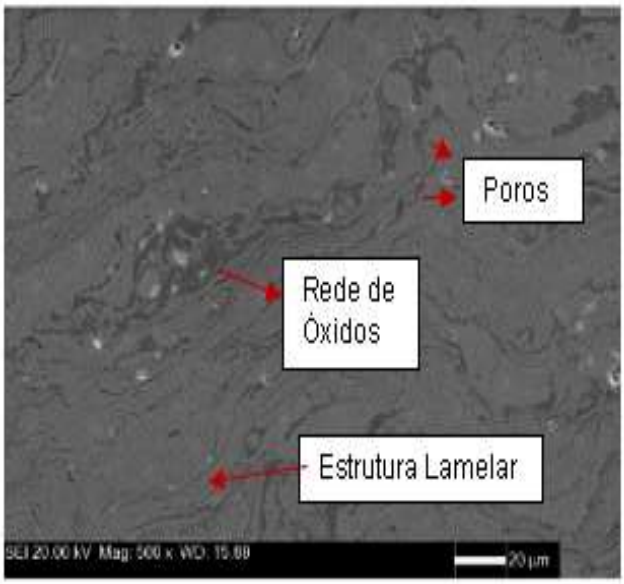
(b)

Figura 45- (a) Morfologia do Espectro 4 (b) Espectro de EDS de linha para a área total

Nas micrografias apresentadas nas Figuras 46,47 e 48 é possível visualizar com mais detalhes a presença de defeitos como poros, óxidos e microtrincas.



46- Aumento original 2000X



47- Aumento original 500X

Figuras 46 e 47- Defeitos apresentados nas micrografias

De acordo com a literatura, Brito 2010 [6], quando a estrutura de lamelas é maior, mais espessa, há menores quantidades de poros nos revestimentos.

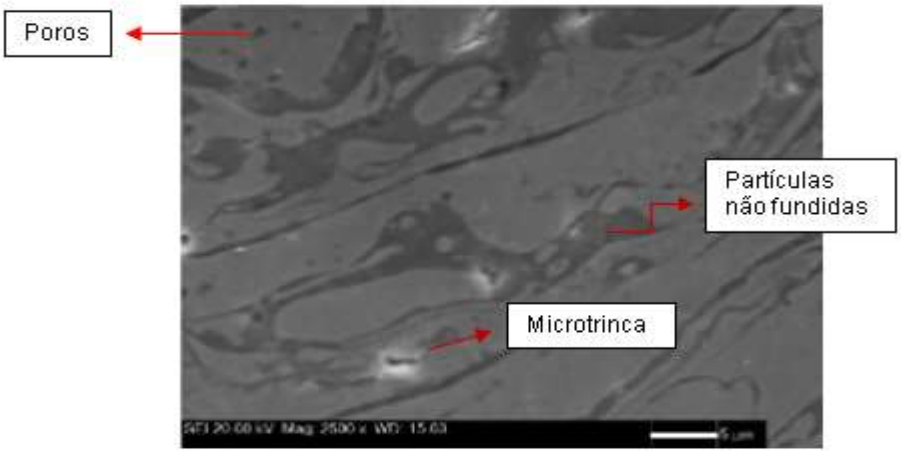
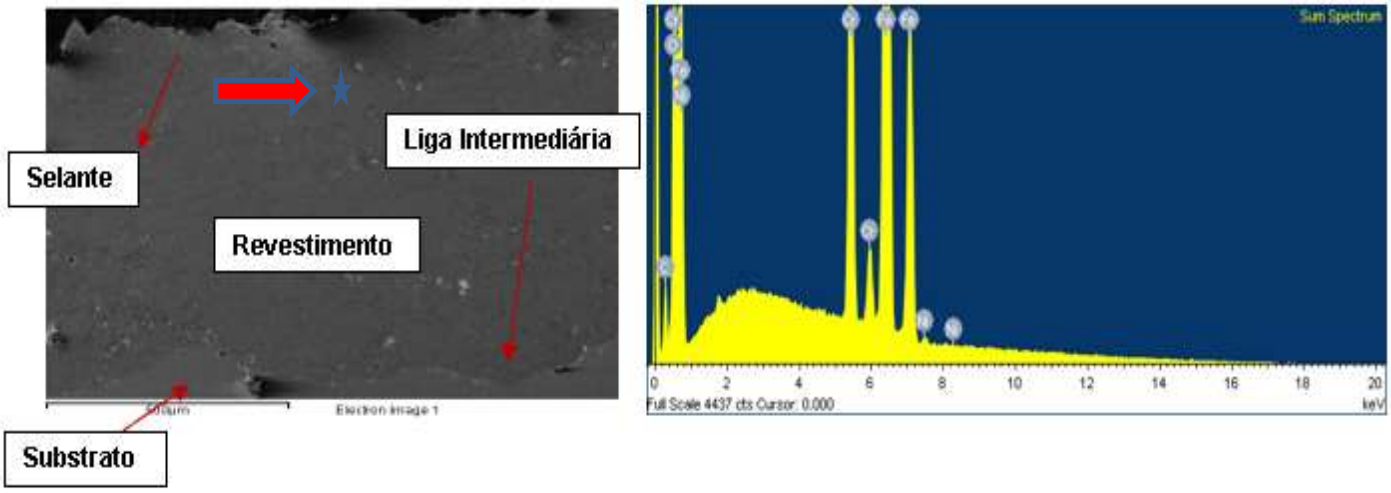


Figura 48- Aumento original 2000X, apresentação de defeitos.

Condição 2: Placa com aplicação do selante Resina Epóxi.

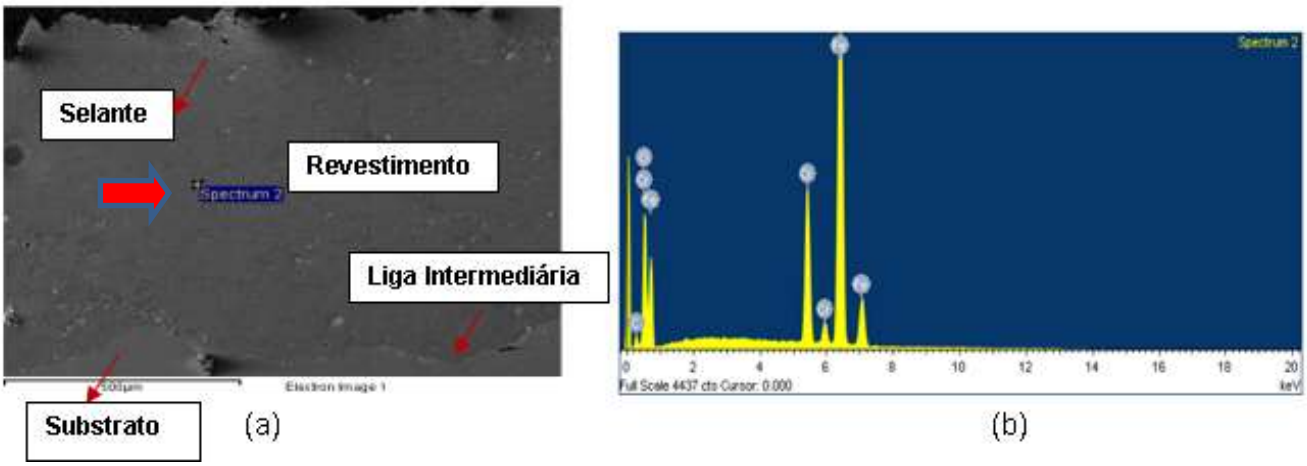
Nessa condição foram analisados 3 pontos diferentes, o primeiro ponto foi próximo a região com selante, o segundo foi na aspersão térmica e o terceiro ponto no substrato, porém bem próximo as linhas intermediárias.



(a) (b)

Figura 49- Amostra com Selante de Resina Epóxi (a) análise de ponto por EDS; (b) Espectro de EDS dos elementos do ponto

Na Figura 49 é possível observar uma grande quantidade dos elementos de liga Fe, Cr e Ni. Tendo como características aumento de dureza e de resistência a corrosão.



(a) (b)

Figura 50- Amostra com Selante de Resina Epóxi (a) análise de ponto por EDS; (b) Espectro de EDS dos elementos do ponto

No Espectro 2, foi um ponto mediano na aspersão em que apresentou na sua totalidade os elementos Fe e Cr.

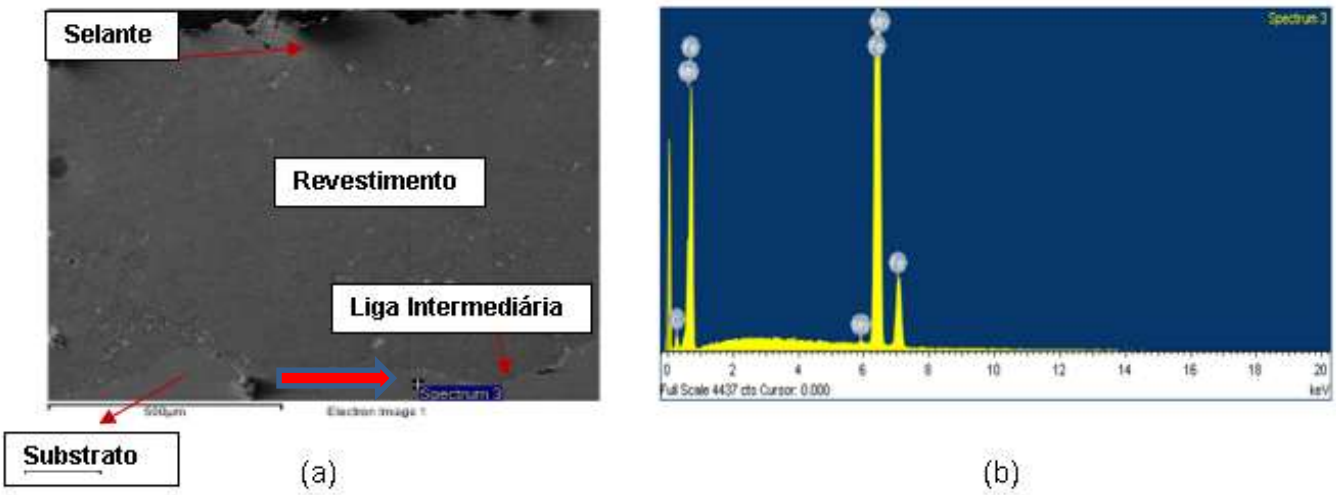


Figura 51- Amostra com Selante de Resina Epóxi (a) análise de ponto por EDS; (b) Espectro de EDS dos elementos do ponto

O Espectro 3, foi a área logo abaixo a liga intermediária do substrato com o revestimento, e este ponto apresentou concentração de Mn e Fe.

Na Figura 52a, é apresentado a morfologia e o EDS de linha da amostra na condição 2, em uma seção que contempla o substrato, liga intermediária e revestimento. Diferentemente da condição 1, o espectro de EDS em linha não contemplou o selante. No gráfico (b) nesta mesma Figura, apresenta em detalhes o espectro EDS da morfologia da Figura (a). Sendo assim é possível concluir que na condição 2 os componentes que predominam no revestimento, ligas intermediária e selante são Fe, Cr, Ni, C e Mo.

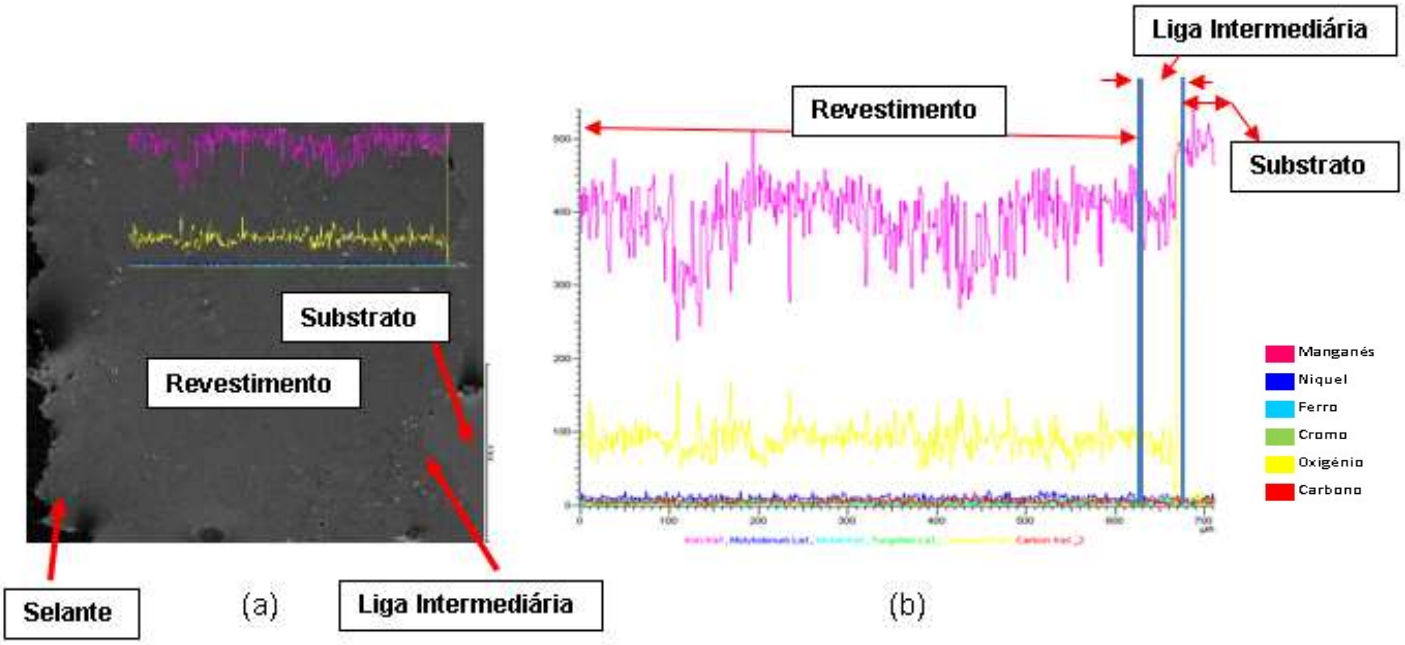


Figura 52 - (a) Morfologia do Espectro (b) Espectro de EDS de linha para a área

As Figuras 53, 54 e 55 apresentam os defeitos referente a amostra na condição 2. Observa-se, que ao menos nos pontos avaliados, há uma degradação maior da aspersão na condição 2.

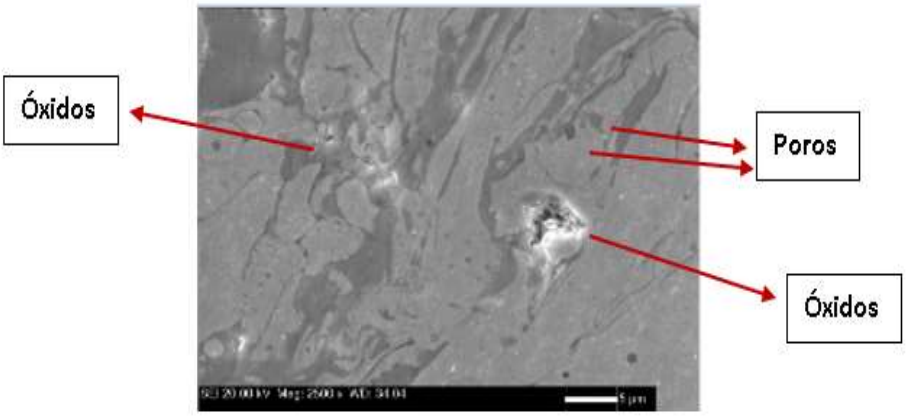


Figura 53- Aumento original 2000X, apresentação de defeitos

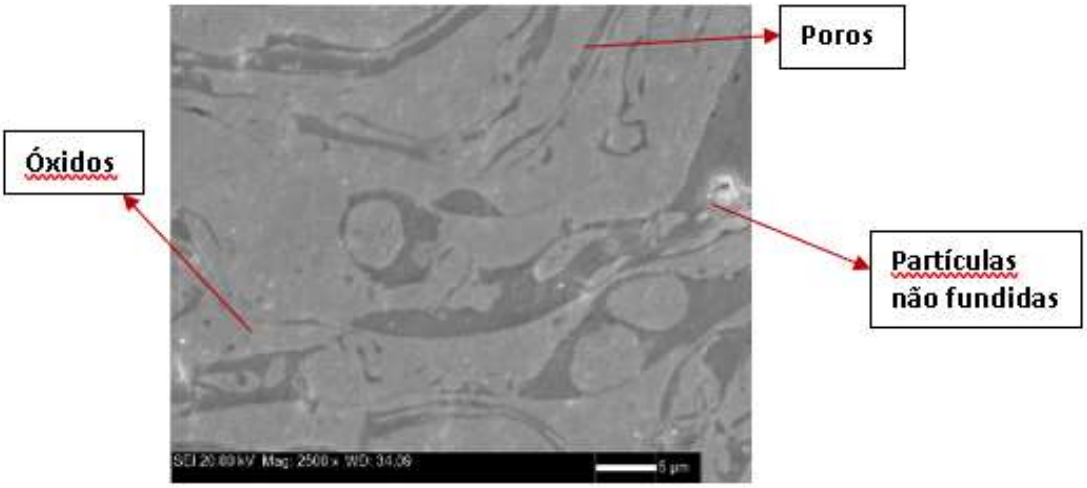


Figura 54- Aumento original 2000X, apresentação de defeitos

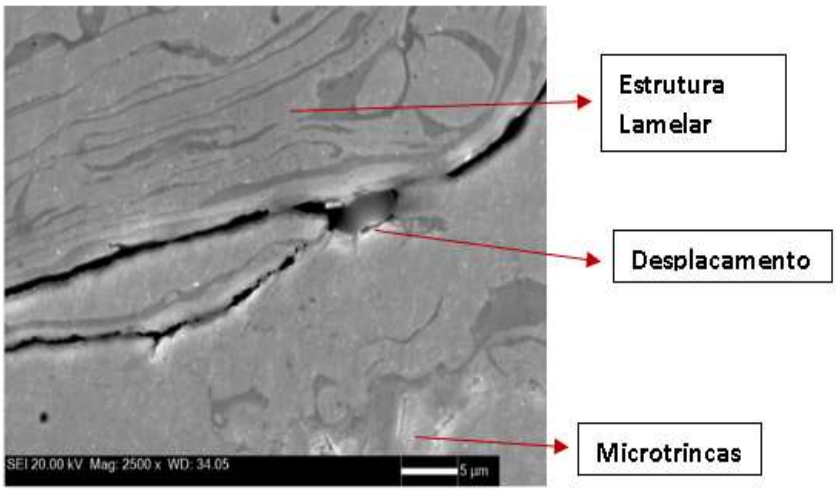


Figura 55- Aumento original 2000X, apresentação de defeitos

3.3 Análise AFM

Essa análise foi realizada três vezes para cada condição. A seguir os principais resultados obtidos nesta análise.

Condição 1: Amostra com selante de Copolímero

Na Tabela 8 constam os valores em três pontos distintos da amostra que possui como selante um Copolímero.

Tabela 8: Verificação da Rugosidade das Amostras

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Rugosidade Média (µm)	0,178	0,6554	0,1489
Área Selecionada (µm)	5,08 X 5,08	5,18 X 5,18	5,18 X 5,18

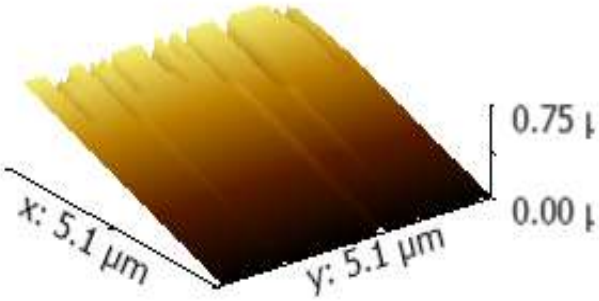


Figura 56- Amostra 1 com selante de Copolímero

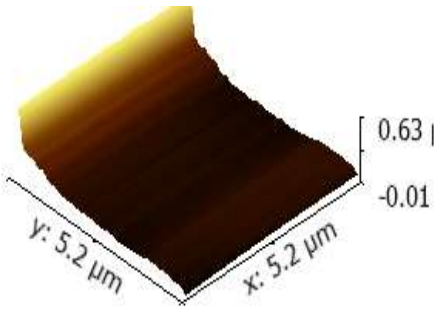


Figura 57- Amostra 2 com selante de Copolímero

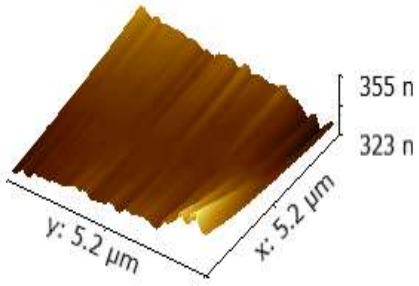


Figura 58- Amostra 3 com selante de Copolímero

Condição 2: Amostra com selante de Resina Epóxi.

Na Tabela 9 constam os valores em três pontos distintos da amostra que possui como selante a Resina Epóxi.

Tabela 9: Verificação da Rugosidade das Amostras

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Rugosidade Média (µm)	0,3225	0,018	0,039
Área Selecionada (µm)	8,40 × 8,40	4,75 × 4,75	4,49 × 4,49

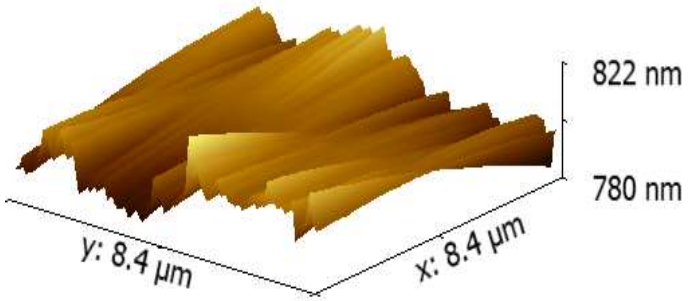


Figura 59- Amostra 1 com selante de Resina Epóxi

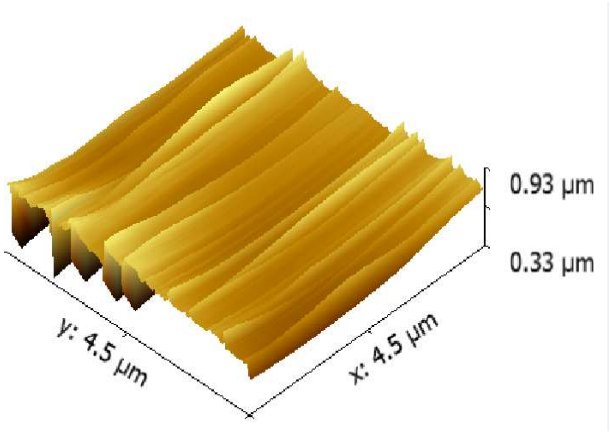


Figura 60- Amostra 2 com selante de Resina Epóxi

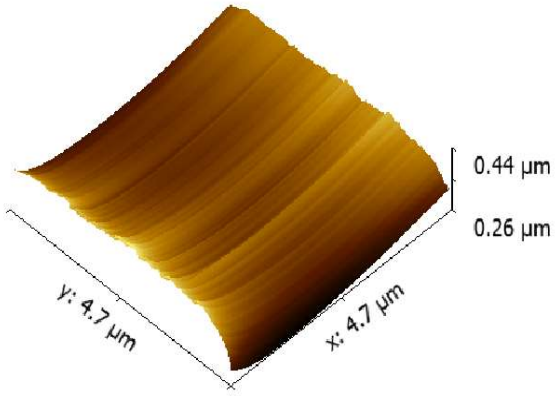


Figura 61- Amostra 3 com selante de Resina Epóxi

Condição 3: Amostra sem selante.

Na Tabela 10 constam os valores em três pontos distintos da amostra que possui não houve a aplicação do selante.

Tabela 10: Verificação da Rugosidade das Amostras

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Rugosidade Média (µm)	0,1894	0,031	0,036
Área Selecionada (µm)	5,08 X 5,08	4,55 x 4,55	4,22 x 4,22

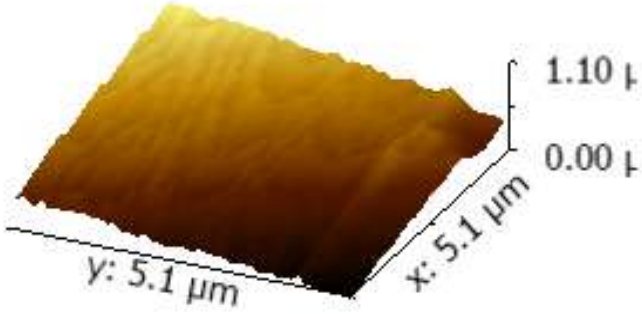


Figura 62- Amostra 1 sem selante

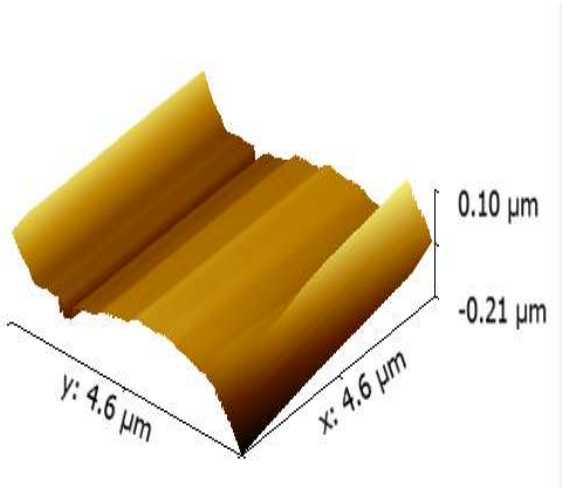


Figura 63- Amostra 2 sem selante

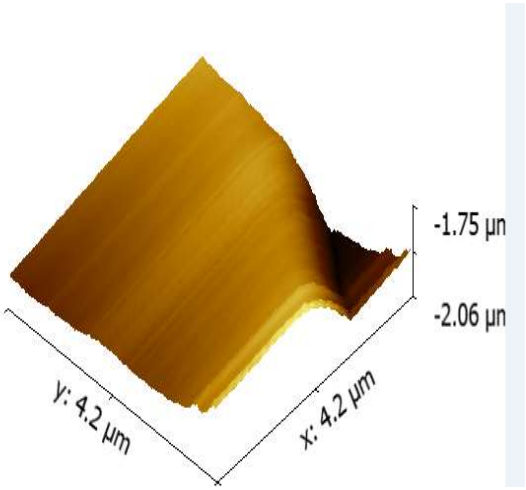


Figura 64- Amostra 3 sem selante

Baseado nessas informações, é possível montar a Tabela 11, comparando cada situação.

Tabela11: Montagem da Rugosidade Média por amostra

	Rugosidade				
Amostra	**Amostra 1 (µm)**	**Amostra 2 (µm)**	**Amostra 3 (µm)**	**Rugosidade Média (µm)**	**Desvio Padrão (µm)**
Com Selante de Copolímero	0,178	0,6554	0,1489	0,327	0,284
Com Selante de Resina Epóxi	0,3225	0,018	0,039	0,127	0,170
Sem Selante	0,1894	0,031	0,036	0,085	0,090

A rugosidade medida foi realizada na superfície após aplicação do selante, onde o selante de copolímero apresentou o maior valor médio, 0,33 µm.

Durante a verificação da Rugosidade média da amostra com selante de resina epóxi o cantiléver quebrou a ponta, não sendo possível fazer as três verificações em áreas similares. Isso deve-se ao fato, conforme as imagens apresentadas, que a amostra com resina epóxi possuía picos que impossibilitava o cantiléver passar pelo local. Foi a superfície mais irregular.

A rugosidade superficial anterior ao processo de aspersão e a aplicação do selante é importante para obter uma boa adesão, no entanto, após a aplicação do selante a sua ausência proporciona uma proteção contra a corrosão, uma vez que tendo menor rugosidade haverá uma menor área exposta ao meio corrosivo, tornando o material menos suscetível a corrosão [9]. Executando a análise do Desvio Padrão, observa-se que as médias estão com valores correlatos, impossibilitando discutir qual possui maior ou menor rugosidade superficial após a aplicação do selante.

3.4 Microdureza Vickers

A seguir será discutido os valores encontrados de Microdureza nas três amostras. Essas análises tem por objetivo avaliar a microdureza em diferentes regiões do material, revestimento, linha intermediária e substrato.

A partir dos dados coletados, foram feitos gráficos com o objetivo de analisar o comportamento da microdureza na amostra. Esses gráficos possuem a média de microdureza Vickers com o desvio padrão de cada condição.

Análise 1: Análise de Microdureza Vickers na amostra que não possui selante.

Nesta análise foram avaliados os pontos na amostra sem selante e realizado o gráfico com o desvio padrão, Figura 65. Na Tabela 12, estão os dados da microdureza em que teve o maior valor médio de microdureza de 374 HV.

Tabela 12: Valores de Microdureza Vickers da Amostra Sem selante

Microdureza (300 HV)	1	2	3	Média	Desvio Padrao
1	395	331	351	359	32,74
2	397	253	401	350	84,32
3	331	363	427	374	48,88
4	256	255	224	245	18,19
5	198	155	200	184	25,42
6	150	155	178	161	14,93

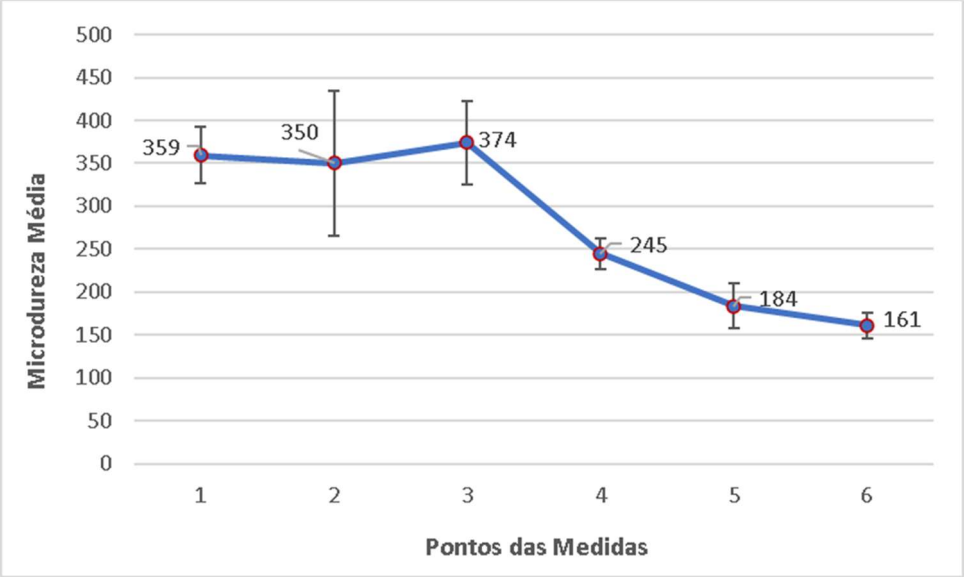


Figura 65- Média dos valores de Microdureza da Amostra sem Selante

Análise 2: Análise de Microdureza Vickers na amostra com Selante de Resina Epóxi.

Nesta análise foram avaliados os pontos na amostra sem selante e realizado o gráfico com gráfico de dispersão, Figura 66. Na Tabela 13, estão os valores da microdureza em que teve o maior valor médio de microdureza de 294 HV.

.

Tabela 13: Valores de Microdureza Vickers da Amostra com Selante de Resina Epóxi

Microdureza (300 HV)	1	2	3	Média	Desvio Padrao
1	372	256	254	294	67,56
2	287	294	307	296	10,15
3	286	286	317	296	17,90
4	254	198	216	223	28,59
5	163	165	148	159	9,29
6	155	156	143	151	7,23

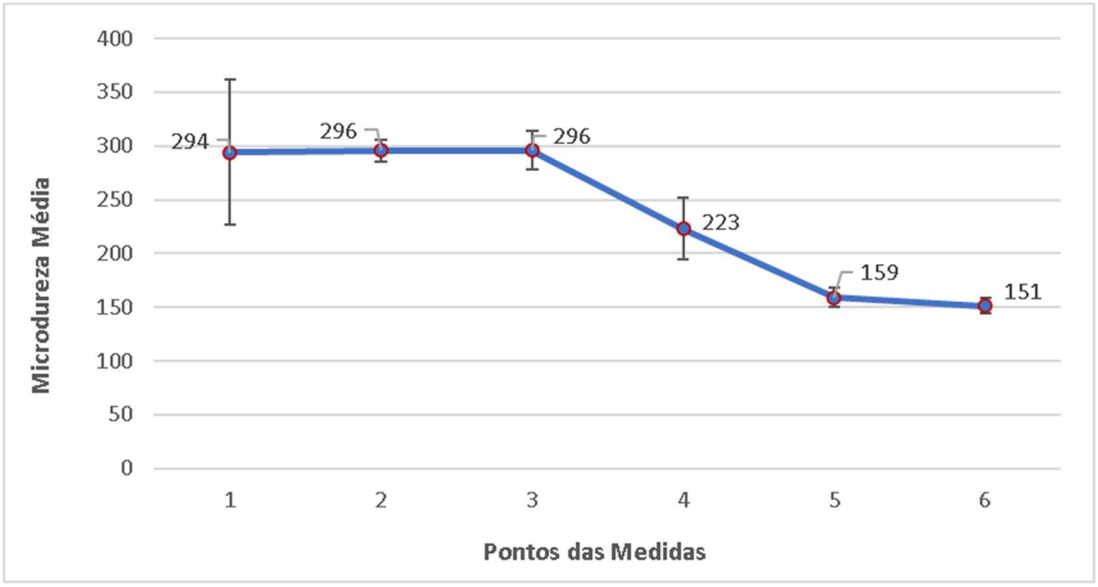


Figura 66- Média dos valores de Microdureza da Amostra com Selante de Resina Epóxi

Análise 3: Análise de Microdureza Vickers na amostra com Selante de Copolímero.

Nesta análise foram avaliados os pontos na amostra sem selante e realizado o gráfico com gráfico de dispersão, Figura 67. Na Tabela 14, estão os valores da microdureza em que teve o maior valor médio de microdureza de 394 HV.

.

Tabela 14: Valores de Microdureza Vickers da Amostra com Selante de Copolímero

Microdureza (300 HV)	1	2	3	Média	Desvio Padrao
1	342	457	291	363	85,03
2	391	329	463	394	67,06
3	217	254	369	280	79,27
4	180	165	243	196	41,39
5	162	188	174	175	13,01
6	146	166	161	158	10,41

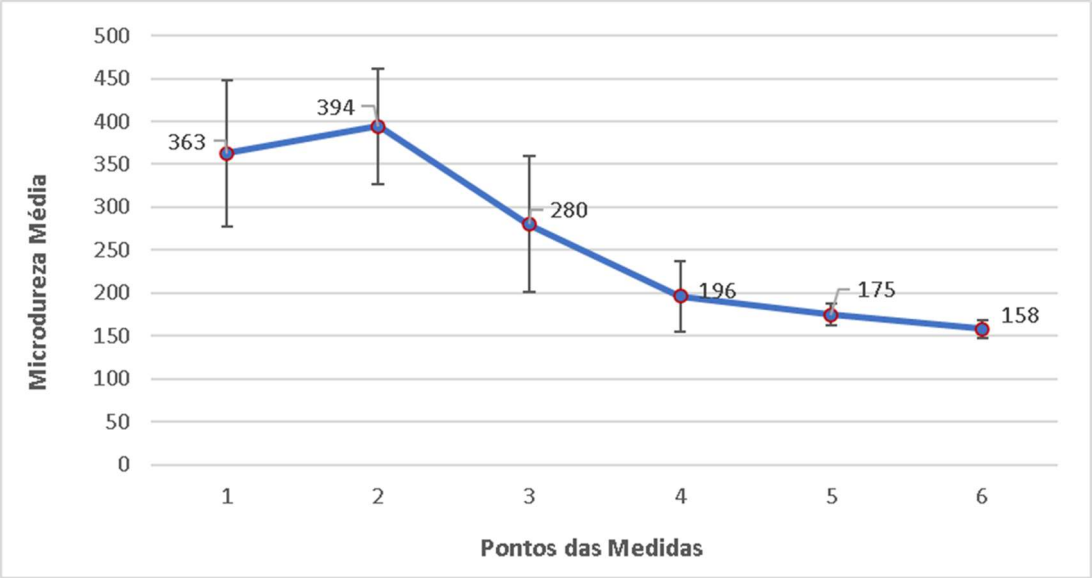


Figura 67- Média dos valores de Microdureza da Amostra com Selante de Copolimero

Para uma melhor análise, será demonstrado na Tabela 15, uma comparação entre os valores de microdureza vickers para cada análise.

Tabela 15: Média dos valores de Microdureza de acordo com cada condição.

Situações Analisadas	Sem Selante	Com Selante de Resina Epoxi	Com Selante de Copolímero
Condição 1	359	294	363
Condição 2	350	296	394
Condição 3	374	296	280
Condição 4	245	223	196
Condição 5	184	159	175
Condição 6	161	151	158

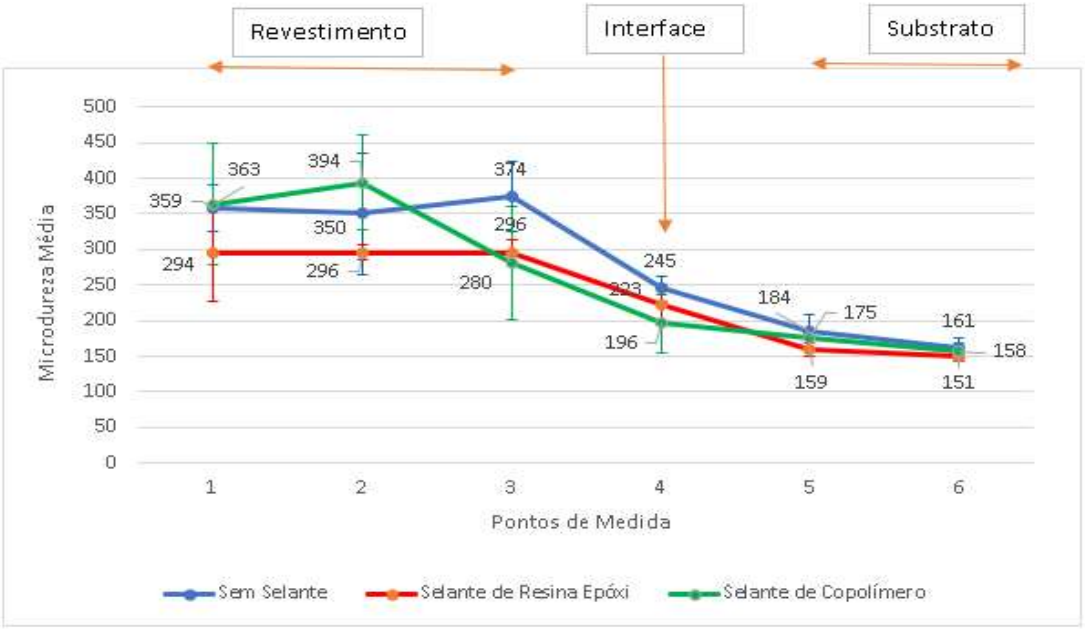


Figura 68- Média dos valores de Microdureza de acordo com cada condição

De acordo com a Figura 68, pode-se observar uma elevada diferença entre o valor médio da dureza no substrato e o valor médio da dureza nos revestimentos. Essa diferença demonstra a eficiência da realização de revestimentos aspergidos termicamente em substratos de aço carbono, e como são importantes para ambientes que necessitam de elevada dureza mecânica.

Realizando a comparação com a amostra sem selante e as demais que que estão com selante, observa-se que sem o selante há uma elevada dureza na aspersão, em contrapartida,

quando aplicado o selante de Resina Epóxi essa dureza superficial reduz. Porém, quando aplicado o Selante de Copolímero a dureza superficial aumenta.

A literatura demonstra, que os processos de Aspersão Térmica são diferentes dos demais processos pois mantêm uma boa relação entre otimização das propriedades mecânicas e a elevação de dureza devido a presença de inclusões metálicas. Quando as inclusões formadas não são metálicas ocorre uma dureza elevada, afetando propriedades mecânicas como redução da resistência a corrosão [14,43].

Sendo necessário uma maior dureza no material, é possível obter no processo de Aspersão Térmica, em que há processos que aumentam ainda mais esse valor comparando com o processo por Arco Elétrico. O processo por Arco Elétrico, em geral, possui valores de dureza entre 345 a 392 HV e os processos por HVOF, por exemplo, conseguem fornecer valores ainda maiores entre 595 a 1354 HV para materiais não ferrosos. Esse estudo também relata a vantagem de obter uma dureza elevada pelo processo de Aspersão Térmica, pois a mesma pode ser realizada sem que o meio ambiente seja prejudicado, quando comparada com o processo de Cromo Duro, por exemplo [47,48].

Um revestimento que possui como elemento de liga o Cr oferece propriedades como aumento da resistência a oxidação e corrosão a altas temperaturas e aumenta a dureza do revestimento formando precipitados duros [49].

A combinação de níquel e cromo obteve os maiores valores de dureza do referido estudo. O Cromo é utilizado também como refinador de grão e diminui a incidência de trincas devido a tensões [18].

Após a realização do teste de variância ANOVA, é possível verificar se a média de três ou mais grupos possem diferenças que são significativas [50].

As análises precisam ser realizadas sob as mesmas condições, então, as análises foram divididas pelos pontos de medida.

O primeiro passo do teste F, é a determinação do Fcrítico, pois é através dele que será determinado a partir de que ponto as médias irão divergir. Como foi analisado por ponto de medida (Tabela 16), devemos determinar o grau de liberdade entre e dentro dos dados [51].

GI entre = 3 – 1 =2 (k-1, k= número de grupos que temos)

GI dentro= 9 – 3 = 6 (Número total de dados – número de grupos)

Tabela 16: Dados para determinação do Fcrítico com 95% de confiabilidade [51]

Tabela F (5% de signficância)

v1 ⇨ / v2 ⇩	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	15	20	24	25	30
1	161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54	241.88	242.98	243.90	245.95	248.02	249.05	249.26	250.10
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.46
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.76	8.74	8.70	8.66	8.64	8.63	8.62
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.94	5.91	5.86	5.80	5.77	5.77	5.75
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.70	4.68	4.62	4.56	4.53	4.52	4.50
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.03	4.00	3.94	3.87	3.84	3.83	3.81
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.60	3.57	3.51	3.44	3.41	3.40	3.38
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.31	3.28	3.22	3.15	3.12	3.11	3.08
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.10	3.07	3.01	2.94	2.90	2.89	2.86
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.94	2.91	2.85	2.77	2.74	2.73	2.70
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.82	2.79	2.72	2.65	2.61	2.60	2.57
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.72	2.69	2.62	2.54	2.51	2.50	2.47
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.63	2.60	2.53	2.46	2.42	2.41	2.38
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.57	2.53	2.46	2.39	2.35	2.34	2.31
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.51	2.48	2.40	2.33	2.29	2.28	2.25
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.46	2.42	2.35	2.28	2.24	2.23	2.19
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.41	2.38	2.31	2.23	2.19	2.18	2.15
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.37	2.34	2.27	2.19	2.15	2.14	2.11

Logo, o Fcrítico é de 5,14, se o Fcalculado for inferior conclui-se que não há diferença entre as médias, se for superior, há diferença.

Calculando F para cada ponto de medida, figura 69:

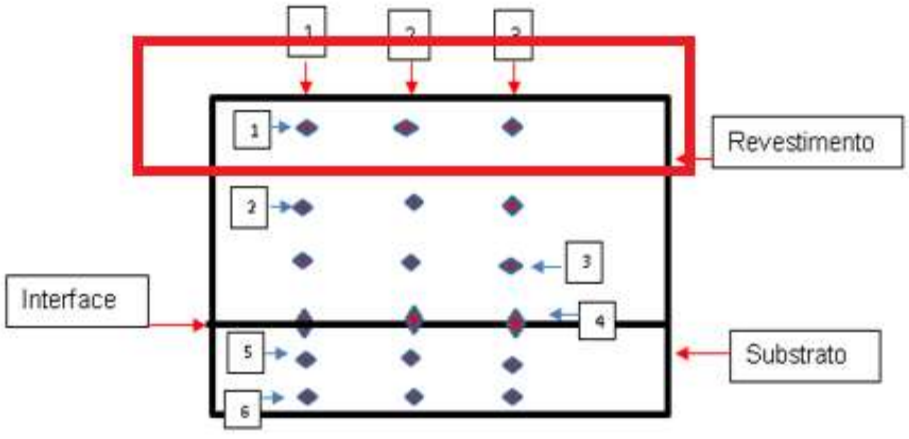


Figura 69: Pontos de medida que foram analisados com o teste F

Na Tabela 17, são apresentadas as amostras (Sem selante, Resina Epóxi e Copolímero) e as três Microdurezas coletadas em cada ponto:

Tabela 17: Cálculo de F para o Ponto de medida 1

	Ponto 1				
	1	2	3	Média	Desvio Padrão
Sem Selante	395	331	351	359	32,74
Resina Epóxi	372	256	254	294	67,56
Copolimero	342	457	291	363	85,03
			Média das Médias	**338,67**	

Variância dentro das amostras: $(\sigma^2_1 \text{ x } \sigma^2_2 \text{ x } \sigma^2_3)/3$

Variância entre médias de amostras: $(((\overline{X} - \overline{x}_1)^2 \text{ x } (\overline{X} - \overline{x}_2)^2 \text{ x } (\overline{X} - \overline{x}_3)^2)/ \text{ k-1}) \text{ x n}$, onde **K** é o número de grupos e **n** o número de variáveis.

F calculado = Variância entre médias de amostras / Variância dentro das amostras

Na Tabela 18, é demonstrado o F calculado para todos os pontos de medida, conforme a fórmula explicada acima.

Tabela 18: Fcalculado para os pontos de Medida

Ponto 1	Variância dentro das amostras	4288,82
	Variância entre medias de amostras X n	4501
	Fcalculado	**1,05**
Ponto 2	Variância dentro das amostras	3903,13
	Variância entre medias de amostras X n	7228
	Fcalculado	**1,85**
Ponto 3	Variância dentro das amostras	2997,83
	Variância entre medias de amostras X n	7588
	Fcalculado	**2,53**
Ponto 4	Variância dentro das amostras	953,84
	Variância entre medias de amostras X n	1807
	Fcalculado	**1,89**
Ponto 5	Variância dentro das amostras	300,63
	Variância entre medias de amostras X n	481
	Fcalculado	**1,60**
Ponto 6	Variância dentro das amostras	127,88
	Variância entre medias de amostras X n	79
	Fcalculado	**0,62**

Sendo assim, pode-se observar que todos os F que foram calculados são inferiores ao F crítico, logo, não há diferença significativa entre as médias.

3.5 Ensaio de Polarização Eletroquímica

As Figuras 70, 71 e 72 demonstram o resultado do ensaio eletroquímico em gráfico Potencial x Densidade da corrente, foram avaliadas as três amostras, sem selante, com selante de copolímero e selante de resina epóxi.

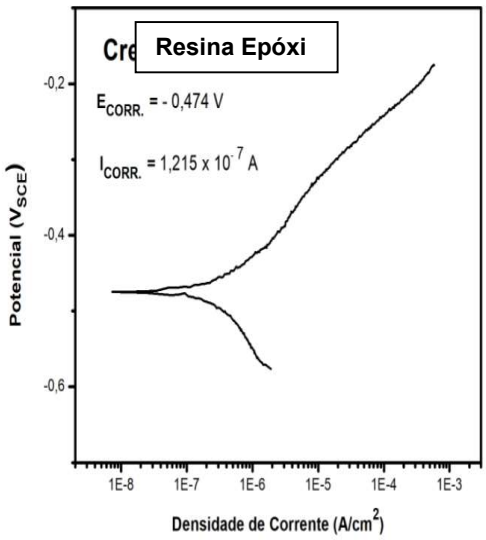


Figura 70- Gráfico Tafel para amostra com selante de Resina Epóxi.

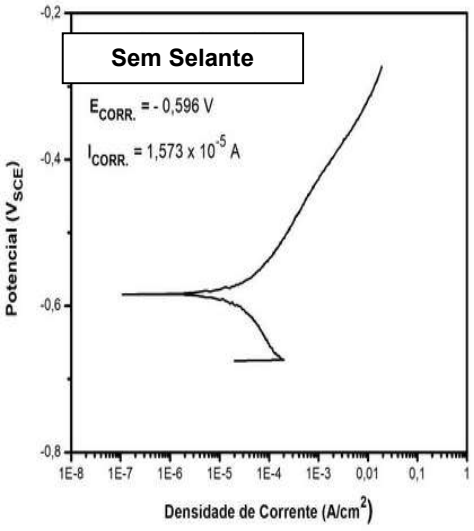


Figura 71- Gráfico Tafel para amostra sem selante.

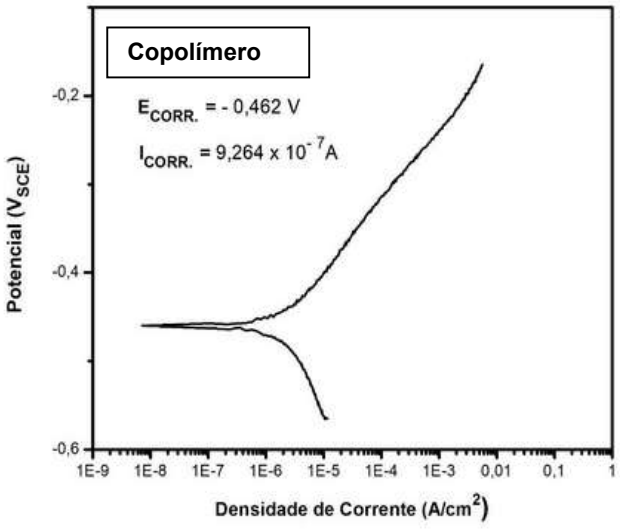


Figura 72- Gráfico Tafel para amostra com selante de Copolímero

A Tabela 19 demonstra valores maiores de potencial de corrosão e menores valores de densidade da corrente das amostras com selante comparando com as sem selante, demonstrando a confirmação da eficiência do selante como uma barreira estável e protetora contra a corrosão. A menor resistência a corrosão das amostras sem selante pode ser explicada por uma maior quantidade de defeitos, microtrincas e inclusões de óxidos, que favorecem a corrosão do revestimento aspergido termicamente [11].

Tabela 19: Valores obtidos através do ensaio de corrosão eletroquímica

Material	E_{corr}	I_{corr}
Selante de Copolímero	-0,462 V	$9,264 \times 10^{-7}$ A
Selante de Resina Epóxi	-0,474 V	$1,215 \times 10^{-7}$ A
Sem selante	-0,596 V	$1,573 \times 10^{-5}$ A

Os dados tabelados permitem uma melhor visualização e comparação. Nas três condições demonstradas o material com selante de copolímero possui um maior potencial de corrosão (-0,462 V) comparado com o selante de resina epóxi (-0,474 V) e a amostra sem selante (-0,596V), sendo assim, o copolímero possui uma maior resistência a corrosão. O material com selante de resina epóxi, apresentou o segundo melhor resultado quanto ao potencial de corrosão.

O material que não possuía o selante para proteger a superfície da amostra apresentou o menor potencial de corrosão, provavelmente devido aos poros que se tornam ativos, facilitando o aumento da propagação da corrosão, sendo das três amostras o que irá corroer mais rapidamente [6].

Sendo assim, pode-se observar que todas as amostras seladas tiveram desempenho significativamente superior medido pelo potencial de corrosão, comparando com a amostra não selada, o que é natural considerando a barreira adicional do selante, confirmando assim sua eficiência.

Conforme Mateus [11], o fato de os resultados da densidade não confirmarem o resultado do melhor desempenho do selante de copolímero, em termos da resistência a corrosão, não houve uma variação significativa considerando assim o melhor resultado do potencial. Essa divergência ocorre devido a diferentes fatores que atuam a favor ou contra a

corrosão, por exemplo: presença de defeitos, estrutura lamelar do revestimento, presença de elementos de liga e rugosidade da superfície.

Elementos de liga contidos na aspersão térmica como Cr e Ni, possuem como característica o aumento na resistência a corrosão [6], porém com a aplicação do selante essa resistência melhora, explicando assim a melhora do potencial de corrosão nessas amostras.

4. Conclusão

A aspersão térmica por arco elétrico com a liga Cr-Ni-Mn permitiu a produção de camadas de revestimento uniforme formadas por panquecas (estrutura lamelar).

O ensaio de Microdureza demonstrou um valor elevado no revestimento, o maior valor encontrado na amostra com copolímero, 394 HV. No substrato e liga intermediária diminui significativamente, atingindo um valor mínimo de 151 HV.

No ensaio de polarização eletroquímica foi constatado a superioridade da condição com selante de copolímero, uma vez que apresentou um melhor potencial de corrosão (-0,462 V), em relação as demais amostras. A amostra com selante de resina epóxi apresentou um potencial de corrosão de -0,474 V e a amostra sem selante, o pior resultado, um potencial de -0,596V.

A análise AFM demonstrou um resultado inconclusivo, pois as áreas não foram correlatas devido à dificuldade do cantiléver varrer a amostra sem que o mesmo fosse danificado e o desvio padrão demonstrou uma igualdade nos valores de rugosidade.

Os resultados demonstraram uma maior eficiência das amostras que utilizaram o selante e dentre os selantes a amostra com selante de copolímero apresentou superioridade em relação a corrosão.

Sugestões para Trabalhos Futuros

- Avaliar outros tipos de revestimentos e processos de aspersão térmica
- Estudo da molhabilidade e capilaridade dos selantes estudados através de MEV.
- Quantificação dos defeitos presentes no revestimento, com e sem selante.
- Realizar outros ensaios de corrosão, como névoa salina, para liga Cr, Ni e Mn e assim confrontar com os dados encontrados neste trabalho.
- Realizar uma melhor Análise com a técnica AFM, em que o cantiléver não encoste na amostra e assim analisar mais áreas com as mesmas dimensões.

5. Referências Bibliográficas

[1] LÓPEZ-ORTEGA, Ainara; BAYÓN, Raquel; ARANA, José Luís. Evaluation of Protective Coatings for High-Corrosivity Category Atmospheres in Offshore Applications. Materials, [s.l.], v. 12, n. 8, 23 abr. 2019. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/ma12081325.

[2] LÓPEZ-ORTEGA, A.; BAYÓN, R.; ARANA, J.l.. Evaluation of protective coatings for offshore applications. Corrosion and tribocorrosion behavior in synthetic seawater. Surface And Coatings Technology, [s.l.], v. 349, p.1083-1097, set. 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.06.089.

[3] BRITO, V.r.s. Sá; BASTOS, I.n.; COSTA, H.r.m.. Corrosion resistance and characterization of metallic coatings deposited by thermal spray on carbon steel. Materials & Design, [s.l.], v. 41, p.282-288, out. 2012. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2012.05.008.

[4] MARANHO, Ossimar. Influência da Preparação da Superfície na Aderência de Revestimentos de alumínio depositados por Aspersão Térmica a chama. 1996. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996.

[5] MARANHO, Ossimar. Aspersão Térmica de ferro fundido branco multicomponente. 2006. 188 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

[6] BRITO, Vinícius Ribeiro dos Santos de Sá. Caracterização de revestimentos metálicos aspergidos termicamente por arco elétrico. 2010. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2010.

[7] LACERDA, Frederico Garcia Bindi de; BRAGA, Antonio Vitor de Castro; BRITO, Thiago Carvalho; SENNA, Lilian Ferreira de; CARDOSO, Bruno Reis; FURTADO, Heloisa Cunha; DINIZ, Marília Garcia. Avaliação de defeitos em revestimentos metálicos aspergidos termicamente por arco elétrico em substratos de geometrias distintas. Brazilian Journal Of Development. Curitiba, p. 18891-18904. 23 fev. 2021.

[8] DORFMAN, Mitchell R. Thermal Spray Coatings. Handbook Of Environmental Degradation Of Materials, [s.l.], p.469-488, 2018. Elsevier. http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-323-52472-8.00023-x.

[9] PINHEIRO, Natalia Rodrigues. Avaliação da liga Cr-Ni-Mn usada como revestimento e obtida pelo processo de Aspersão Térmica. 2017. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2017.

[10] SOCIETY, American Welding. Thermal Spraying: Practice, theory and application. Disponível em:<https://infostore.saiglobal.com/en-us/standards/aws-tss-1985-167121_SAIG_AWS_AWS_409136/#>. Acesso em: 07 nov. 2018.

[11] CARNEIRO, Mateus Rangel Duarte. Aspectos de Resistência à corrosão de ligas de Níquel-Cromo e Cobalto-Cromo obtidas pelo processo de Aspersão Térmica por arco elétrico. 2016. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2016.

[12] BORCHATE, Cristiano. Desenvolvimento de um dispositivo de para aspersão térmica por arco elétrico. 2013. 56 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade Horizontina, Horizontina, 2013.

[13] PAREDES, Ramón S. Cortés. Estudo de Revestimentos de Alumínio depositados por três processos de Aspersão Térmica para a proteção do aço contra a corrosão Marinha. 1998. 266 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

[14] PADILHA, Hélio. Estudo sobre Revestimentos depositados por Aspersão Térmica para melhorar o desempenho de conexões elétricas. 2005. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

[15] SÁNCHEZ., Hernando Vélez. Recubrimientos de 560 AS producidos con el sistema de proyección termica por arco. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Magister En Ingeniería Mecánica, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2013.

[16] VREIJLING, M.P.W. Electrochemical Characterization of Metallic Thermally Sprayed Coatings. Ph.D. Thesis, TNO Institute of Industrial Technology, Delft, Netherlands,1998.

[17] PAREDES, Ramón S. Cortés. Aspersão Térmica. 2012. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM314/Material%20Guia%20da%20discilina%20de%20Aspers%C3%A3o%20T%C3%A9rmica/Apostila%20Aspers_o%20T_rmica%202012.pdf>. Acesso em: 01 maio 2019.

[18] FREITAS, Bruno Cavalcante. Estudo das Propriedades microestruturais de ligas Ni-Cr e Co-Cr obtidas pelo processo de metalização a arco elétrico. 2015. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2015.

[19] NOVICK, Nilceu. Aplicação da Aspersão térmica na soldagem em operação de tubulações com pequena espessura remanescente. 207 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

[20] ANTUNES, Fernando José. Avaliação da adesão e da resistência à corrosão de revestimentos de Cr e Co obtidos através da técnica de Aspersão Térmica. 2013. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2013.

[21] TRAN, A.t.t. et al. Effects of Surface Chemistry on Splat Formation During Plasma Spraying. Journal Of Thermal Spray Technology, [s.l.], v. 17, n. 5-6, p.637-645, 29 out. 2008. Springer Nature. http://dx.doi.org/10.1007/s11666-008-9237-6.

[22] PAWLOWSKI, L.; The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings; 2ª edição; Reino Unido, Wiley Publishing, 2008.

[23] GONZALEZ, José Crespo. Análise da Porosidade em Camadas Protetoras Produzidas por Aspersão Térmica. 2013. 44 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia de Sorocaba (Faetec), Sorocaba, 2013.

[24] GUY Antou, et al. Characterizations of the pore-crack network architecture of thermal-sprayed coatings. Materials Characterization, [s.l.], v. 53, n. 5, p.361-372, dez. 2004. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2004.08.015.

[25] SOUZA, Vanessa Moura de; MARQUES, Angela Selau; HUFF, Jorge Antênio. Avaliação de ferramenta revestida através do processo de aspersão térmica HVOF. Congresso anual da ABM, 71., 2016, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Enemet, 2016. p. 91 - 99. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/download-pdf/avaliacao-de-ferramenta-revestida-atraves-do-processo-de-aspersao-termica-hvof>. Acesso em: 25 out. 2018.

[26] J. KNUUTTILA; P. Sorsa; T. Mäntylä. Sealing of Thermal Spray Coatings by Impregnation. Journal Of Thermal Spray Technology. Tampere, Finland, p. 249-257. jun. 1999.

[27] H. Y. Li, D. D. Wei, et al. Effect of sealing treatment on corrosion behaviours of arc sprayed zinc coatings. Corrosion Engineering, Science And Technology, [s.l.], v. 48, n. 1, p.65-70, fev. 2013. Informa UK Limited. http://dx.doi.org/10.1179/1743278212y.0000000040

[28] GENTIL, V., Corrosão, Brasil, LTC Editora, 6ª Edição Rio de Janeiro, Brasil, 2011

[29] SERRÃO, Laís Ferreira. Análise de corrosão do aço inoxidável AISI 317L em soluções ácidas e salinas. Dissertação de Mestrado. UFF, Niterói, 2017.

[30] MERÇON, F.; GUIMARÃES, P. I. C. e MAINIER, F. B.; Corrosão: um Exemplo Usual de Fenômeno Químico. Química Nova Escola, v. 1, n. 19, p. 1114, 2004.

[31] RAMANATHAN, L.V., Corrosão e seu controle, Brasil, Hems Editora, São Paulo, Brasil.

[32] LIMA, Alexandre Pereira, Efeito da deformação mecânica a friono processo corrosivo do Aço API 5L X65 em água do mar sintética, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2019

[33] NUNES, L.P., Fundamentos de resistência à corrosão, Brasil, Editora Interciência Ltda, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.

[34] WOLYNEC, Stephan. Técnicas Eletroquímicas de Corrosão, Edusp, 2003, Brasil.

[35] JAMBO, H. C. M.; FÓFANO, S.; Corrosão: Fundamentos, Monitoração e Controle. Rio de Janeiro: Ed. Ciência Moderna, 2008.

[36] GUENTHER, Bárbara Luiza. Avaliação da taxa de corrosão, resistência a corrosão e taxa de delaminação de um aço de baixo carbono revestido com polímero de dispersão aquosa. 2020. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2020.

[37] YAMAGUCHI, Patrícia Soyuri. Dinâmica e controle não-lineares da microscopia de força atômica (AFM), incluindo-se termos de ordem fracionária no modelo matemático. 2020. 74 f.

Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Bauru, 2020.

[38] PINTO, Everton Pinheiro; RAMOS, Glenda Quaresma; FONSECA FILHO, Henrique Duarte da. O Microscópio de Força Atômica (AFM): importante ferramenta no estudo de morfologia de superfícies na escala nanométrica. Estação Científica (unifap), Macapá, v. 3, n. 2, p.40-50, dez. 2013. Disponível em: <https://periodicos.unifap.br/index.php/estacao>. Acesso em: 05 ago. 2019.

[39] FERREIRA, Antonio Aparecido; Yamanaka, Hideko; Microscopia de Força Atômica Aplicada em Imunoensaios; Química Nova, Vol. 29, n° 1, 137-142, 2006

[40] CORTÉS, Ramón S.; Sofia, Ana C.M.d' Oliveira; Efeito da Rugosidade e do preaquecimento do substrato na morfologia e aderência de revestimentos de alumínio depositados por aspersão térmica. Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná.

[41] NANOSURF EASYSCAN 2 AFM, Versão 1.6, Instrução de Operação. Suíça: Nanosurf Ag, 2007. 164 p. Disponível em: <https://www.usna.edu/Users/physics/vanhoy/_files/SP425/LabDocs/STM/Installation%20CD/Manuals/easyScan%202%20AFM%20Operating%20Instructions.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2019.

[42] SIMUNOVIC, Katica 2010. Thermal Spraying Welding Engineering and Technology: Thermal Spraying, pp1-25, London: Ed Eolss Publishers.

[43] TERRES, C.J.F., Avaliação de revestimentos de aços inoxidáveis depositados por aspersão térmica, Dissertação de Mestrado, UFPR, Curitiba, 2006.

[44] NORMA ABNT NM 87:2000, Aço Carbono e Ligados para Construção Mecânica, 2000.

[45] http://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo.php?codAssunto=121, INFOMET, Aços e Ligas – Inclusões não metálicas, acessado em 16 de novembro de 2020

[46] MARQUES, Davi Alves, Avaliação da Influência da Rugosidade superficial na corrosão de ligas metálicas, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Ceará, 2018.

[47] POLLNOW, Edison Nunes, Aspersão Térmica – Um método limpo e eficiente para a Substituição do Cromo Duro, Rijez Indústria Metalúrgica, São Leopoldo, Rio Grande do Sul, Publicada em 27 de junho de 2013.

[48] LIMA, Carlos Roberto Camello; Trevisan, Roseana da Exaltação, Ensaio de Adesão em Revestimentos Metal-Cerâmicos obtidos por Aspersão Térmica a Plasma, 1999.

[49] GONZÁLES, R., Cadenas, M., Fernandez, R., Cortizo, J.L., Rodriguez,E.; Wear behaviour of flame sprayed NiCrBSi coating remelted by flame or by laser, Wear, 262, p.301-307, 2006.

[50] LJS Pinto, F de Souza Freire - Enfoque: Reflexão Contábil, 2013 - periodicos.uem.br. DOI: https://doi.org/10.4025/enfoque.v32i1.20496

[51] PERTICARRARI, Amanda Liz Pacífico Manfrim. Testes de significância. Disponível em: https://www.fcav.unesp.br/Home/departamentos/cienciasexatas/AMANDALIZPACIFICOMANFRIM/aula-4.pdf. Acesso em: 22 ago. 2021.