CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

AVALIAÇÃO DA LIGA Cr-Ni-Mn USADA COMO REVESTIMENTO E OBTIDA PELO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA

Natalia Rodrigues Pinheiro

Dissertação de Mestrado 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.

Orientador:

Hector Reynaldo Meneses Costa

Rio de Janeiro

Maio de 2017

AVALIAÇÃO DA LIGA Cr-Ni-Mn USADA COMO REVESTIMENTO E OBTIDA PELO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA

Dissertação de Mestrado 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.

Natalia Rodrigues Pinheiro

Aprovada por:

_____

Prof. Dr. Hector Reynaldo Meneses Costa (CEFET/RJ) (orientador)

_____

Prof. Dr. Ricardo Alexandre Amar de Aguiar (CEFET/RJ)

_____

Profa. Dra. Marilia Garcia Diniz (UERJ)

Rio de Janeiro

Maio de 2017

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

P654 Pinheiro, Natalia Rodrigues
Avaliação da liga Cr-Ni-Mn usada como revestimento e obtida pelo processo de aspersão térmica / Natalia Rodrigues Pinheiro.— 2017.
90f. : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2017.
Bibliografia : f. 87-90
Orientador : Hector Reynaldo Meneses Costa

1. Ligas (Metalurgia). 2. Liga de cromo-níquel-manganês. 3. Aspersão térmica. 4. Revestimento em metal. 5. Aço-carbono. I. Costa, Hector Reynaldo Meneses (Orient.). II. Título.

CDD 669.73

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por permitir que este projeto se realizasse, acompanhando-me em todas as suas fases e a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho, em especial:

Ao meu orientador, professor Hector Reynaldo Meneses Costa, pelo incentivo, orientação e dedicação, sem os quais seria impossível a realização deste projeto.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, pela infraestrutura e pelo conhecimento fornecido durante a Graduação e o Mestrado.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

À VGK Engenharia/RJ, pelas aplicações dos revestimentos estudados e conhecimentos técnicos transmitidos.

Aos graduandos, Júlia Bonaldo e Júlia Trojan, e aos técnicos do Laboratório LASMAT/CEFET, pela ajuda e apoio em boa parte dos experimentos efetuados.

Aos meus familiares, pelos ensinamentos e pelo amor que sempre me guiaram no caminho correto. Principalmente aos meus pais, Jorge e Neuraci, que são meus amigos de todas as horas e meus professores da escola da vida.

Ao meu marido, Daniel, pelo apoio e compreensão durante todo o meu período de aprendizado tanto na Graduação como no Mestrado.

EPÍGRAFE

"O estudo em geral, a busca da verdade e da beleza são domínios em que nos é consentido ficar crianças toda a vida."

(Albert Einstein)

RESUMO

AVALIAÇÃO DA LIGA Cr-Ni-Mn USADA COMO REVESTIMENTO E OBTIDA PELO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA

Natalia Rodrigues Pinheiro

Orientador:

Hector Reynaldo Meneses Costa

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.

O processo de aspersão térmica tem se destacado no mercado pela sua capacidade de proporcionar melhores propriedades mecânicas e de proteger o aço da sua eventual perda de material, através da aplicação de camadas de revestimento. Esse trabalho teve como objetivo avaliar a microestrutura de revestimentos de Cr-Ni-Mn depositados em substratos com dois formatos diferentes e compostos de aço carbono. O tipo de Processo de Aspersão Térmica utilizado foi o Arco Elétrico, com a posterior aplicação de dois selantes de propriedades distintas. Foi realizada uma avaliação microestrutural por Microscopia Óptica (MO) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Também foram avaliadas a propriedade da dureza dos revestimentos por Ensaio de Microdureza Vickers e a quantificação de defeitos, usando Processamento Digital de Imagem (PDI). Os resultados obtidos por MO e MEV indicam que os revestimentos mostraram uniformidade na camada depositada e pequena quantidade de óxidos e porosidades. As microdurezas obtidas para os revestimentos, apresentaram valores com um aumento significativo em relação aos valores dos substratos. Em relação a porosidade, as condições estudadas apresentaram percentuais aceitáveis e similares aos encontrados na literatura. Os formatos dos substratos influenciaram na microestrutura formada, indicando que a condição de placa possuí uma tendência a formar uma melhor microestrutura e com menos defeitos. A utilização dos selantes mostrou que o selante a base de copolímero proporciona excelente penetração e é uma alternativa em relação aos selantes tradicionais.

Palavras-chave: Aspersão térmica. Revestimento. Selante

Rio de Janeiro

Maio de 2017

ABSTRACT

EVALUATION OF THE Cr-Ni-Mn ALLOY USED AS COATING AND OBTAINED BY THERMAL SPRAY PROCESS

Natalia Rodrigues Pinheiro

Advisor:

Hector Reynaldo Meneses Costa

Abstract of dissertation submitted to Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais – 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.

The thermal spray process has been outstanding in the market for its ability to provide better properties and to protect the steel from its eventual material loss, by applying coating layers. This work has as main objective the evaluation of properties of Cr-Ni-Mn coatings formed by the spray of alloys onto the surface of two different forms of carbon steel substratum. The process used was thermal spray by electric arc of metallic coatings, applying two sealants with different properties. An assessment of the microstructural morphology by Optical Microscope (OM) and Scanning Electron Microscope (SEM) was made, and also evaluation of the coatings proprieties by Vickers Microhardness measurement and defects quantification, using Digital Image Processing (DIP). The results obtained by OM and SEM indicated that the coatings showed uniformity throughout the deposited layer and low amount of oxides and porosities. Microhardness showed higher values than those founded on substratum. Regarding porosity, the studied conditions showed acceptable and similar percentage compared with studies found in literature. The shape of substratum can be considered as an influence into the microstructure formed, so is possible to say that plates tend to create a better microstructure and with less imperfections. The use of the sealants showed that copolymer sealant provides excellent penetration and is an alternative over traditional sealants.

Keywords: Thermal spray. Coating. Sealant

Rio de Janeiro

May, 2017

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Componentes necessários para o Processo de Aspersão Térmica	18
Figura 2 -	Tipos de Processos de Aspersão Térmica conforme as fontes de energia	19
Figura 3 -	Processo de Soldagem por Fusão (a) Elementos envolvidos (b) Macrografia de junta soldada	20
Figura 4 -	Processo Aspersão Térmica (a) Elementos envolvidos; (b) Micrografia de substrato revestido	20
Figura 5 -	Adesão e Coesão	21
Figura 6 -	Camada Heterogênea	22
Figura 7 -	Jateamento Abrasivo realizado em superfície metálica	23
Figura 8 -	Micrografia Eletrônica de Varredura da seção transversal de TBC	25
Figura 9 -	Superfície de Revestimento (a) Sem Pré-aquecimento (b) Com Pré-aquecimento	26
Figura 10 -	Elementos Envolvidos no Processo de Aspersão Térmica a Arco Elétrico	27
Figura 11 -	Técnica de Aspersão para revestimento de Eixos	28
Figura 12 -	Técnica de Aspersão para revestimento de Placas	29
Figura 13 -	Desenho da Seção Transversal do revestimento formado por Aspersão	34
Figura.14 -	Elementos Selecionados (a) Eixo sem revestimento; (b) Placa com aplicação de apenas uma camada de revestimento	39
Figura 15 -	Placa com aplicação de Resina	40
Figura 16 -	Aplicação de Selantes. (a) Placa; (b) Eixo	41
Figura 17 -	Corte (a) Máquina de Corte COR-80; (b) Corte transversal sendo realizado	44
Figura 18 -	Amostra 5 devidamente Cortada.	44
Figura 19 -	Máquina de embutir AROTEC Modelo PRE-30	45
Figura 20 -	Lixas usadas na ordem crescente de granulometria: 100, 220, 320, 400, 500, 600	45
Figura 21 -	Equipamento ARATEC AROPOL 2V	46
Figura 22 -	LAMAT, CEFET-RJ (a) Microscópio Óptico; (b) Software Material Extension	46
Figura 23 -	Micrografia obtida da Amostra 4, sem acabamento superficial	47

Figura 24 - Laboratório do CEFET-RJ. (a) MEV; (b) Imagem do vídeo obtido 47
Figura 25 - Ensaio de Dureza (a) Durômetro; (b) Medição realizada para a determinação da Mircodureza Vickers 48
Figura 26 - Revestimento da representação das doze Indentações realizadas na camada de revestimento da Amostra 3, Placa com Selante 1 48
Figura 27 - Calibração do Microdurômetro para realização das medições 49
Figura 28 - Software FIJI ImageJ 1.49 49
Figura 29 - Imagem Tratada no Software FIJI 50
Figura 30 - Classificação das Inclusões conforme a Norma ASTM E 45 51
Figura 31 - Tipos de Porosidade 52
Figura 32 - Amostra 1, Eixo com Selante 2. (a) Aumento de 200x; (b) Aumento de 500x 53
Figura 33 - Amostra 2, Eixo com Selante 1. (a) Aumento de 200x; (b) Aumento de 500x 53
Figura 34 - Amostra 3, Placa com Selante 1. (a) Aumento de 200x; (b) Aumento de 500x. 54
Figura 35 - Amostra 4. Placa com Selante 2. (a) Aumento de 200x; (b) Aumento de 500x. 54
Figura 36 - Amostra 5, Placa com Selante 1, sem polimento e com Aumento de 200x 58
Figura 37 - Amostra 6, Placa com Selante 2, sem polimento e com Aumento de 100x 58
Figura 38 - Penetração dos Selantes com Aumento de 200x. (a) Amostra 5, com Selante 1; (b) Amostra 6, com Selante 2 59
Figura 39 - Amostra 7, Placa sem Selante. (a) Espectro de EDS em Linha; (b) Histograma 61
Figura 40 - Amostra 7, Placa sem Selante. (a) Posição da análise de Ponto por EDS; (b) Espectro obtido com a indicação do elementos obtidos 62
Gráfico 1 - Elementos presentes no revestimento 64
Figura 41 - Inclusões não metálicas e Poros 66
Figura 42 - Microestruturas ideais pelo MEV. (a) Foto superior: Inclusões metálicas; (b) Foto inferior: Estrutura lamelar 67
Figura 43 - Microestruturas a serem evitadas. (a) Foto superior: Óxidos; (b) Foto inferior: Poros e Rede de Óxidos 68

Figura 44 - Distribuição das doze Indentações 69
Gráfico 2 - Amostra 1. (a) Em relação ao número de camadas; (b) Em relação à espessura 71
Gráfico 3 - Amostra 2. (a) Em relação ao número de camadas; (b) Em relação à espessura 73
Gráfico 4 - Amostra 3. (a) Em relação ao número de camadas; (b) Em relação à espessura 75
Gráfico 5 - Amostra 4. (a) Em relação ao número de camadas; (b) Em relação à espessura 77
Gráfico 6 - Média Global das Microdurezas das Amostras 78
Gráfico 7 - Padrão Médio de distribuição da Microdureza conforme o número de camadas 79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Características do Processo de Aspersão Térmica por Arco Elétrico	29
Tabela 2 -	Elementos químicos utilizados para melhorar a Resistência ao Desgaste	33
Tabela 3 -	Elementos químicos utilizados para melhorar a Resistência à Corrosão	34
Tabela 4 -	Composição química do substrato	37
Tabela 5 -	Composição dos arames no Processo Aspersão Térmica a Arco Elétrico	38
Tabela 6 -	Propriedades Físicas dos arames	39
Tabela 7 -	Especificações dos Eixos	40
Tabela 8 -	Especificações das Placas	41
Tabela 9 -	Características dos Selantes	42
Tabela 10 -	Amostras dos Eixos e Placas	43
Tabela 11 -	Elementos presentes no revestimento obtidos por EDS	63
Tabela 12 -	Influência dos elementos nas propriedades do revestimento	65
Tabela 13 -	Valores da Dureza Vickers (HV), Rockwell C (HRc) e Brinell (HB)	70
Tabela 14 -	Valores da Dureza Vickers (HV), Rockwell C (HRc) e Brinell (HB)	72
Tabela 15 -	Valores da Dureza Vickers (HV), Rockwell C (HRc) e Brinell (HB)	74
Tabela 16 -	Valores da Dureza Vickers (HV), Rockwell C (HRc) e Brinell (HB)	76
Tabela 17 -	Resultados de Defeitos	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AS: "*Arc Spray*"

ASTM: "*American Society for Testing and Materials*"

AT: Aspersão Térmica

CEFET/RJ: CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLOGICA

D.Sc: "*Doctor of Science*"

LAMAT: Laboratório de Materiais

MEV: Microscópio Eletrônico de Varredura

PDI: Processamento Digital de Imagem

SAE: "*Society of Automotive Engineers*"

TBC: Thermal Barrier coatings

TGO: ThermalGrown Oxide

SUMÁRIO

Introdução **16**

1 Referencial Teórico **18**

1.1. Processo de Aspersão Térmica 18

1.1.1. Visão Geral 18

1.1.2. Adesão e Coesão 21

1.1.3. Procedimentos 21

1.1.3.1. Preparo da Superfície 22

1.1.3.2. Texturização 24

1.1.3.3. Aplicação de Camadas Intermediárias 24

1.1.3.4. Pré-Aquecimento 25

1.1.3.5. Aplicação do Selante 26

1.2. Processo de Aspersão Térmica a Arco Elétrico 27

1.2.1. Técnica para Revestimento de Eixos 28

1.2.2. Técnica para Revestimento de Placas 28

1.2.3. Características do Processo 29

1.3. Propriedades Mecânicas 30

1.3.1. Resistência Mecânica 31

1.3.2. Aderência 31

1.3.3.Dureza 32

1.3.4. Tenacidade 32

1.3.5. Resistência ao Desgaste 33

1.3.6.Resistência à Corrosão 33

1.4. Microestrutura do Revestimento 34

1.4.1. Óxidos 35

1.4.2. Poros 35

1.4.3. Partículas Aderidas de Estrutura Lamelar 36

1.4.4. Partículas não Fundidas de Estrutura Esferoidizada 36

1.4.5. Microtrincas 36

2 Metodologia 37

2.1. Características dos Materiais 37

2.1.1. Substrato 37

2.1.2. Arames 38

2.1.3. Preparação dos Corpos de Prova 39

2.1.3.1. Eixos 40

2.1.3.2. Placas 40

2.1.3.3. Selantes 41

2.2. Preparo das Amostras 42

2.2.1. Corte das Amostras 44

2.2.2. Embutimento 44

2.2.3. Lixar e Polir 45

2.3. Microscopia Óptica (MO) 46

2.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) 47

2.5. Ensaio de Microdureza Vickers 48

2.6. Análise de Defeitos por Processamento Digital de Imagens (PDI) 49

3 Resultados 51

3.1. Microscopia Óptica (MO) 51

3.1.1. Inclusões 55

3.1.2. Aspecto dos Poros 57

3.1.3. Avaliação dos Selantes 58

3.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) 61

3.2.1. Análise de Linha Obtida por EDS 61

3.2.2. Análise de Ponto Obtida por EDS 62

3.2.3. Análise dos Elementos Químicos 63

3.2.4. Otimização das Propriedades 65

3.2.5. Avaliação da Microestrutura 66

3.3. Ensaio de Microdureza Vickers 69

3.3.1. Medidas de Microdureza para Amostra 1, Eixo com Selante 2 70

3.3.2. Medidas de Microdureza para Amostra 2, Eixo com Selante 1 72

3.3.3. Medidas de Microdureza para Amostra 3, Placa com Selante 1 74

3.3.4. Medidas de Microdureza para Amostra 4, Placa com Selante 2 76

3.3.5. Comparativo entre as Amostras Avaliadas 78

3.4. Análise de Defeitos no Revestimento 81

Considerações Finais **85**

Sugestões para Trabalhos Futuros **86**

Referências **87**

Introdução

O Processo de Aspersão Térmica consiste em aplicar uma camada de revestimento sobre um determinado material, denominado substrato. Tal revestimento formado é gerado por partículas finamente divididas e aquecidas, seja pelo calor gerado da queima de um gás combustível ou pela geração de um arco elétrico. Após o aquecimento, essas partículas são aceleradas por gás comprimido para serem confinadas num feixe e assim, dirigidas ao substrato. O choque das partículas na superfície do substrato forma o revestimento com estrutura lamelar, capaz de se conformar e aderir à superfície previamente preparada para o Processo de Aspersão Térmica [1].

Esse processo inclui um grande número de variáveis e componentes envolvidos. É considerado como um processo de natureza sinergística, ou seja, ele não pode ser generalizado, pois depende da natureza e comportamento das microestruturas formadas, que variam conforme o tipo de material a ser utilizado, tanto para o substrato como para o revestimento. Tal característica promove a realização de uma série de estudos tornando possível analisar as particularidades de cada variação do processo, cujo objetivo consiste em formar um revestimento que contenha uma microestrutura capaz de otimizar as propriedades mecânicas do substrato e de protegê-lo [2,3].

Uma das vantagens da otimização das propriedades mecânicas é oferecer uma melhor resistência mecânica e também aumentar a resistência à corrosão, tornando-se o maior atrativo para a indústria naval. Isto se deve ao fato de que os materiais empregados nas construções de estruturas navais, como plataformas e embarcações marítimas, devem possuir uma relação adequada entre alta resistência mecânica e baixo peso, encarecendo o material utilizado, assim como na indústria automobilística. E também, a constante exposição à salinidade presente no meio marítimo causa corrosão no material aplicado a este ambiente, fazendo com que surja o interesse e a necessidade desse setor em investir nas técnicas de preservação do material utilizado, como o Processo de Aspersão Térmica.

Outro atrativo desse processo, consiste no reparo de peças que sofrem com desgaste superficial, como por exemplo, eixos de bombas. Na maioria dos casos é possível recuperar o equivalente a 5 milímetros de espessura das peças desgastadas com aplicação da camada de revestimento, que além de efetuar o reparo das peças danificadas, também aumenta a resistência original ao desgaste por corrosão. Consequentemente, o reparo das peças por esse processo torna-se financeiramente mais vantajoso para as demais indústrias investirem no processo, ao invés de efetuar a constante substituição de peças danificadas por nova. Dessa forma, o tempo

em que o equipamento fica inoperante é reduzido e a vida útil das peças é aumentada com a melhoria da resistência ao desgaste.

Pode ser obtido também uma melhoria na condutividade ou no isolamento térmico e elétrico de peças que são expostas a trabalhos em altas temperaturas, condição esta, que acelera o processo de corrosão, oxidação e desgaste do material. Normalmente utilizam-se camadas de revestimento cerâmico que irão funcionar como barreiras térmicas sobre o substrato, chamados de Thermal Barrier Coatings (TBC). Porém, esses tipos de revestimentos apresentam uma vida útil limitada por causa da diferença entre os valores dos seus coeficientes de expansão térmica com os do substrato, o que é capaz de gerar elevadas tensões térmicas levando ao trincamento do revestimento [2].

Apesar dos benefícios citados anteriormente, a tecnologia empregada para o Processo de Aspersão ainda necessita de mais estudos e testes com o intuito de compreender os mecanismos de adesão envolvidos na formação do revestimento, assim como a influência que os parâmetros utilizados durante o processo possuem na formação da microestrutura e composição do revestimento, para que se alcance as devidas melhorias nas propriedades mecânicas do substrato com a aplicação do revestimento.

Por sua vez, o objetivo deste estudo consiste particularmente em analisar a microestrutura formada nas camadas de revestimentos dos substratos de dois formatos diferentes e compostos de Aço Carbono SAE 1020, utilizando o Processo de Aspersão Térmica a Arco Elétrico (AS) e a consequente aplicação de dois tipos diferentes de selantes sobre o revestimento formado. Dessa forma foi possível analisar como a seleção adequada dos parâmetros utilizados nesse estudo e os formatos do substrato, influenciaram na microestrutura formada e na otimização da microdureza.

Para isso, no Capítulo 2 foi necessário analisar como os principais parâmetros afetam os Processos de Aspersão de uma maneira geral, visto que esse processo possuí uma natureza sinergística.

No Capítulo 3, foram expostos os testes realizados na análise experimental, sendo necessário fabricar amostras a partir de corpos de prova cedidos pela Empresa VGK.

No Capítulo 4, foram apresentados os resultados obtidos da análise experimento e discutido os seus resultados.

Por último, foram apresentadas as conclusões sobre o presente estudo e as sugestões para trabalhos futuros, no sentido de dar continuidade ao estudo e obter novos resultados com a utilização de outras técnicas.

Capítulo 1 - Referencial Teórico

Este Capítulo foi destinado ao estudo do Processo de Aspersão Térmica de maneira a contemplar informações que podem ser aplicadas a qualquer tipo de processo escolhido para a fabricação de revestimentos, tais como: a visão geral, a adesão, os procedimentos anteriores e os procedimentos posteriores ao processo. Dessa forma, a base do estudo foi elaborada ao comparar certos fundamentos utilizados nos processos de soldagem com os utilizados no Processo no Processo de Aspersão Térmica.

Neste Capítulo, foi também dado destaque ao Processo a Arco Elétrico (AS), por ter sido o processo utilizado na fabricação dos revestimentos em análise. Por fim, foi relatada a busca de melhorias nas propriedades mecânicas do substrato, e como elas podem ser obtidas através da composição microestrutural formada pelas camadas de revestimento.

1.1. Processo de Aspersão Térmica

1.1.1. Visão Geral

O Processo de Aspersão Térmica ou Metalização é capaz de fundir diversas classes de materiais como metais, cerâmicos, polímeros e compósitos [1,2]. Para isto, é necessário selecionar parâmetros que variam conforme as particularidades e finalidades de cada tipo de processo e materiais. Independente dessa seleção, o Processo de Aspersão Térmica necessita de três elementos fundamentais para ser realizado: uma fonte de calor; uma liga sobre a forma de arame, pó, cordão ou barra; e um jato sobre forma de ar comprimido ou gás [1,2], ilustrados na Figura 1.

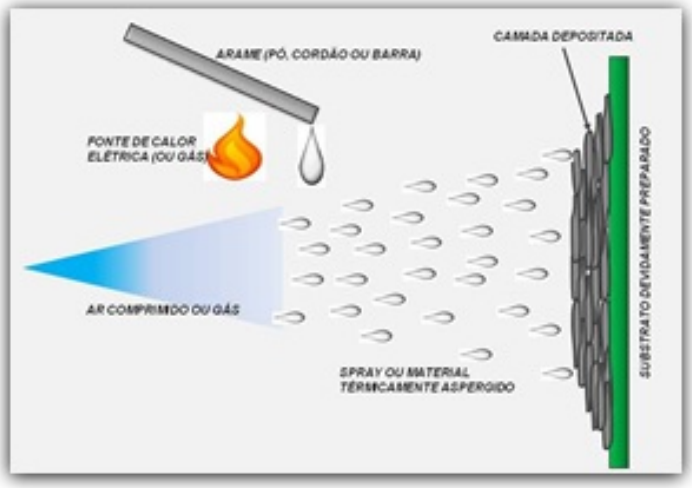


Figura 1 - Componentes necessários para o Processo de Aspersão Térmica [2].

A classificação dos diferentes tipos de Processo de Aspersão é feita de acordo com o material a ser aplicado, o método de aquecimento e o método de aceleração das partículas em direção ao substrato [2,3]. Dessa forma, os processos podem ser agrupados em três grupos básicos de acordo com a fonte de calor utilizada, conforme a Figura 2.

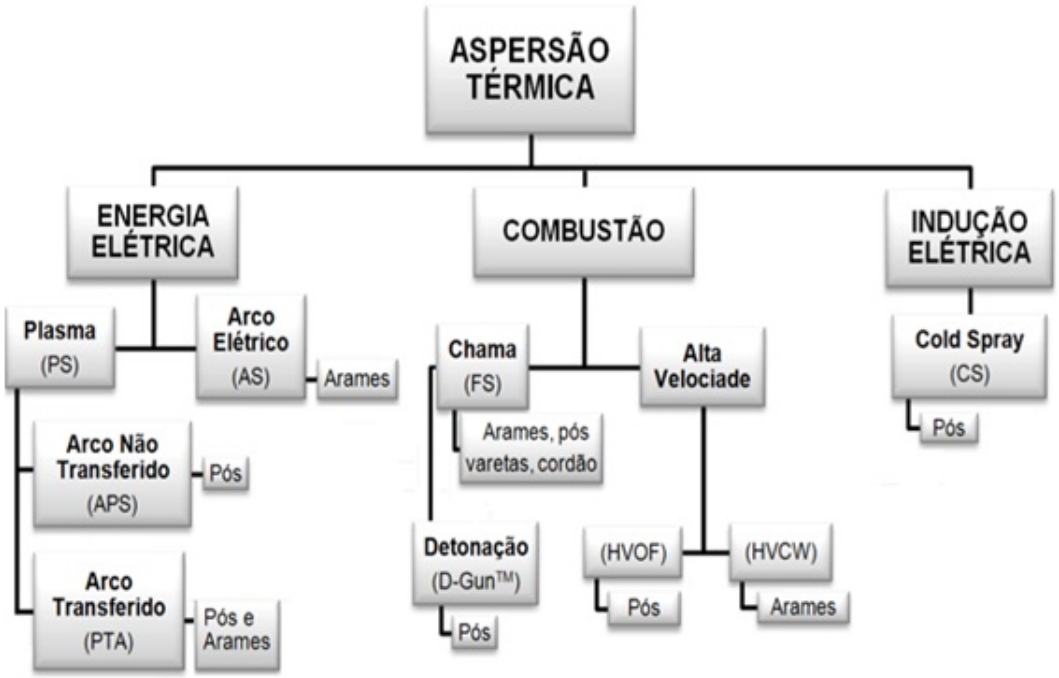


Figura 2 - Tipos de Processos de Aspersão Térmica conforme as fontes de energia [3].

O material do substrato é metálico, normalmente o Aço (Fe-C), que possui uma microestrutura formada por um grande número de átomos dispostos, em uma estrutura cristalina. Os átomos no interior dessa microestrutura mantêm suas ligações completas com outros átomos vizinhos, em um nível de energia mínimo. Porém, os átomos da superfície estão ligados a outros com menos vizinhos, mantendo um acúmulo de energia. A equalização da energia na superfície é possível através da união com outro material, capaz de gerar uma força de interação entre as partículas formando novas ligações mecânicas superficiais [4].

Nos Processos de Soldagem, a união entre dois materiais ocorre por meio de fusão ou por meio de pressão. Nos Processos por Pressão ocorre a deformação da superfície de contato para permitir a aproximação dos átomos, formando ligações por difusão. Nos Processos por Fusão ocorre a aplicação de calor para fundir o metal base com o metal de adição. Esse último processo destrói as superfícies de contato e forma uma zona termicamente afetada. Consequentemente, a solidificação do metal fundido forma uma zona fundida, que resulta na união dos materiais, como observado na Figura 3 [4].

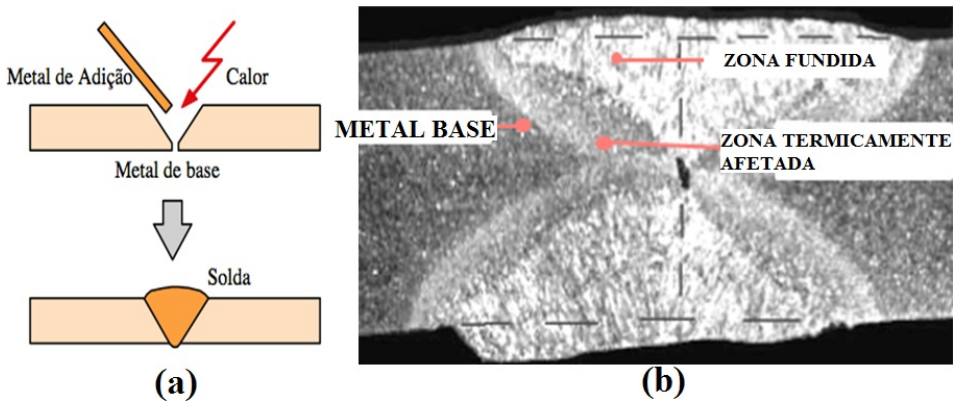


Figura 3 - Processo de Soldagem por Fusão (a) Elementos envolvidos (b) Macrografia de junta soldada [4].

Nos Processos de Aspersão Térmica não haverá fusão entre as partículas aspergidas e o substrato, impossibilitando a formação de uma zona termicamente afetada, diferente dos Processos de Soldagem por Fusão. A fusão ocorrerá somente nas partículas aspergidas, e antes delas atingirem a superfície do substrato, como pode ser observado na Figura 4 [4].

Consequentemente, estas irão se ancorar à superfície ondulada do substrato devido à rugosidade da superfície, formando ligações após a sua solidificação. As ligações formadas em sua maior totalidade serão mecânicas de ancoramento. A desvantagem desse tipo de ligação é que o revestimento fica sujeito a um desprendimento devido ao choque mecânico [3].

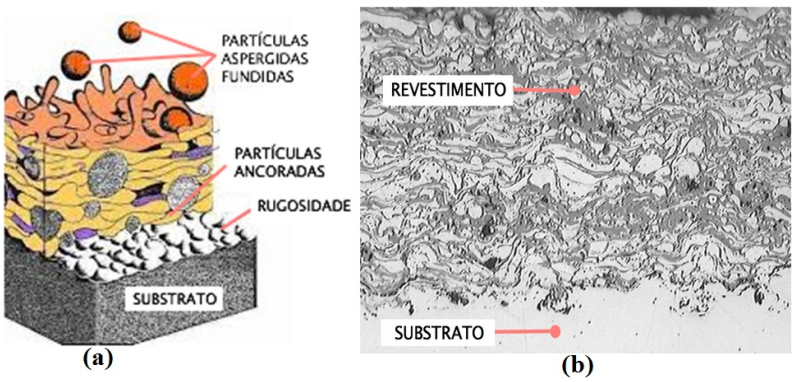


Figura 4 - Processo Aspersão Térmica (a) Elementos envolvidos; (b) Micrografia de substrato revestido [3].

Outros tipos de ligações, como a difusão e a adesiva, também podem ocorrer durante o processo, porém com menos frequência. A difusão necessita de alta temperatura e pressão aplicadas, a fim de quebrar as ligações dos átomos vizinhos e causar o deslocamento dos átomos. Isso precisa ocorrer ao longo das discordâncias, caso contrário, o caminho percorrido é pelos

contornos de grãos e nas superfícies externas, passando a ser considerada extremamente pequena. A ligação adesiva é formada com as forças de interação de Van Der Waals, sendo considerada uma ligação secundária por ser fraca. Ela possui um efeito mais significativo quando o material é um polímero [3].

1.1.2. Adesão e Coesão

As ligações formadas entre partículas aspergidas e entre estas e o substrato são complexas, envolvendo fatores mecânicos, metalúrgicos e químicos [3]. Porém é possível analisá-las por meio da adesão e da coesão. Conforme ilustrado da Figura 5.

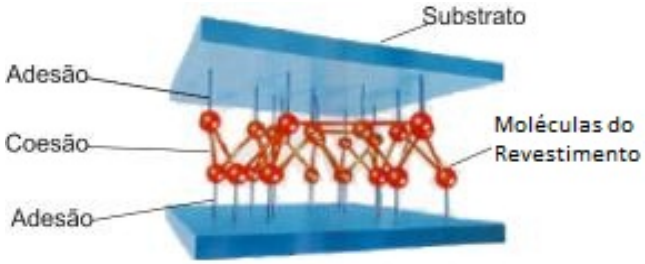


Figura 5 - Adesão e Coesão [5].

A adesão é a propriedade da matéria capaz de permitir a atração entre moléculas diferentes, formando ligações químicas [5,6]. No Processo de Aspersão Térmica ela ocorre entre a camada de revestimento e a superfície do substrato.

A coesão se diferencia por ser a força de atração entre moléculas de mesma composição, caracterizando a capacidade do material de se permanecer unido, resistindo a separação [6]. Ela pode ocorrer no interior do substrato e no interior do revestimento.

O ideal é que a adesão seja sempre maior do que a coesão, e que a coesão do revestimento seja menor do que a do substrato [7]. Dessa forma, caso uma eventual fratura surja, ela ocorrerá entre as camadas do revestimento, preservando o substrato. A intensidade da adesão e da coesão sofre influência de outros fatores, tais como: o material do revestimento, a área a ser revestida, o formato do substrato, a velocidade no impacto das partículas e as reações físicas e químicas que ocorrem na formação da camada de revestimento [8].

1.1.3. Procedimentos

A adesão e a coesão podem ser melhoradas com a utilização de procedimentos a serem realizados anteriormente ao processo como, o preparo da superfície, a texturização, aplicação de

camadas intermediárias e o pré-aquecimento. Outros procedimentos também podem ser utilizados com a finalidade de melhorar a qualidade do revestimento após o processo. É importante ressaltar que a má execução ou negligência desses procedimentos podem formar um revestimento com uma microestrutura frágil e quebradiça, que facilita a propagação de trincas, podendo deixar o substrato exposto à corrosão, oxidação, desgaste e altas temperaturas [3, 8].

1.1.3.1. Preparo da Superfície

Primeiramente deve-se preparar a superfície do substrato, com o objetivo de eliminar a presença de contaminantes. A permanência dos contaminantes permite a formação de camadas de revestimento mais fracas, justamente devido à sua grande capacidade de aderirem às camadas de revestimento [9].

Os contaminantes podem estar presentes na superfície do substrato em forma de camadas. Partindo do metal base ou substrato, encontra-se uma camada de segregação que provavelmente ainda é metálica, mas possui composição química diferente devido a fenômenos de segregação dos elementos de ligas e impurezas. A segunda camada é composta de óxidos que podem estar fortemente ou fracamente ligados à superfície [9].

A terceira camada é composta de hidróxidos e água. Pode haver outra camada de contaminantes adsorvidos como enxofre, azoto, halógenos, dependendo da reatividade do metal e dos poluentes do meio em que fora fabricado [9]. Por último, pode haver uma camada de pó e óleo, devido às condições de armazenamento do metal base. Portanto, a superfície metálica apresenta uma camada heterogênea de contaminantes, representada na Figura 6.



Figura 6 - Camada Heterogênea [9].

Algumas camadas de óxidos são fracamente ligadas ao substrato metálico e devem ser removidas, como exemplo, o cobre. Outras camadas de óxidos são fortemente ligadas ao substrato e até protegem a superfície contra a corrosão, como é o caso do alumínio. E outras são

fortemente ligadas ao metal base por se revestirem com uma camada de água, como é o caso dos aços inoxidáveis, onde o níquel e o cromo ficam com camada de óxidos que se revestem, de pelo menos, uma camada de água. Em todo caso, é importante remover a camada de óxido superficial desconhecida e substituí-la por outra bem controlada e protetora através de métodos de preparação de superfície, porque uma fraca ligação existente entre as camadas de óxido e a superfície, pode ser facilmente rompida, prejudicando a adesão do revestimento [3, 8, 9,10].

A escolha do método deve ser feita levando em consideração o tipo de material do revestimento e do substrato. Eles se caracterizam pelo seu tipo de limpeza e dos padrões utilizados, que devem estar de acordo com os parâmetros das normas ABNT NBR 6405 [10] e SIS 055900/67 [11].

Normalmente utiliza-se o jateamento abrasivo. Ele é um método que remove as camadas frágeis de contaminantes e altera a natureza química da superfície, ao utilizar um fluxo de material abrasivo em alta velocidade, com ar ou água, sobre a superfície [3,8,12], conforme ilustração na Figura 7.



Figura 7 - Jateamento Abrasivo realizado em superfície metálica [12].

O tipo e tamanho do abrasivo influenciam no resultado final, sendo necessário analisar alguns parâmetros para determinar qual abrasivo é recomendado. O ideal é utilizar partículas pontiagudas, duras e anguladas, ao invés de partículas esféricas ou arredondadas [8].

O resultado esperado é que a remoção dos contaminantes apresente uma superfície com grau de limpeza (Sa), e com um grau de corrosão em superfícies de aço, padronizados pela norma ISO 8501-01 [13].

Um cuidado especial deve ser tomado nos casos em que os substratos são projetados para resistir a fortes pressões mecânicas. Esses tipos de substratos devem passar por um processo de

ensaio mecânico não destrutivo, com o intuito de verificar se há formação de trincas na superfície após a remoção dos seus contaminantes, visto que as trincas não podem ser reparadas pelo Processo de Aspersão, e que essas falhas estruturais do substrato também poderão induzir às mesmas falhas nas camadas de revestimento [3, 8].

1.1.3.2. Texturização

A texturização consiste em tornar a superfície do substrato mais rugosa e capilar. Dessa forma, uma superfície rugosa apresentará mais aderência em relação a uma superfície lisa, devido ao aumento da sua área superficial [3, 8].

O jateamento abrasivo é utilizado para fornecer o valor adequado de rugosidade média (R_a), ao selecionar adequadamente o tamanho do abrasivo a ser utilizado [3, 8]. Esse método é capaz de proporcionar à superfície a remoção de seus contaminantes e, ao mesmo tempo, torná-la mais rugosa e capilar, tornando se o método mais utilizado nos Processos Aspersão Térmica.

A caracterização da rugosidade é estabelecida pela Norma ABNT NBR 6405 [10], dessa forma, é possível obter padrões para o estabelecimento de valores adequados da R_a a serem utilizados no Processo. Normalmente, utiliza-se a R_a na faixa de 2,5 a 13 μm, para a maioria dos revestimentos. Exceto para peças metálicas de espessura fina, em que o valor da rugosidade deve ser 1,3 μm. Em caso de peças plásticas revestidas com materiais de baixo ponto de fusão, como o zinco, a rugosidade mínima deve ser de 6 μm [3,8,14].

Apesar da adesão aumentar conforme a rugosidade da superfície aumenta, em relação à uma superfície lisa, esse aumento só é possível até 10 μm. Um aumento excessivo da rugosidade, acima desse valor, acaba diminuindo a adesão. Portanto, a melhor relação entre adesão e rugosidade, é obtida coma utilização de partículas abrasivas da ordem de ¾ de diâmetro [3, 8].

1.1.3.3. Aplicação de Camadas Intermediárias

Algumas metodologias exigem que após a preparação da superfície e da texturização, sejam aplicadas camadas intermediárias compostas de outras substâncias, como primers ou camadas de ligação metálica. Suas finalidades abrangem uma melhora nas propriedades superficiais do substrato, melhora na adesão das partículas aspergidas, e proteção da superfície do substrato.

O primer é indispensável nos casos em que os substratos deverão ser armazenados por um determinado período tempo, para proteger a superfície [3, 8, 15].

A camada de ligação metálica é muito utilizada para a aplicação de Revestimento TBC.

Elas são aplicadas sobre o substrato formando a chamada *bondcoat*, com a finalidade de garantir a aderência do revestimento cerâmico mediante a oxidação do meio. Isso porque, a camada de óxido, chamada de TGO, é formada entre a *bondcoat* e o revestimento, devido à exposição a altas temperaturas [15]. A Figura 8 ilustra as três principais camadas em adição ao substrato da superliga de níquel e ao revestimento cerâmico de baixa condutividade.

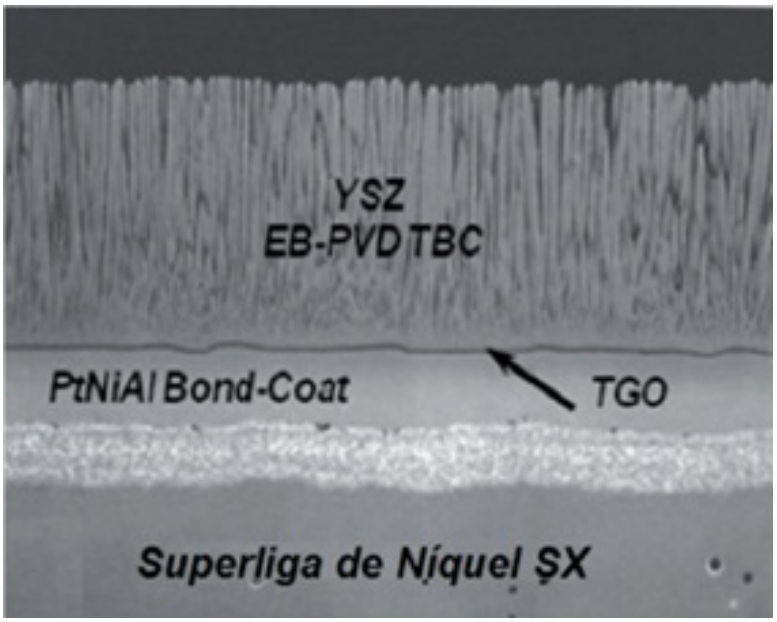


Figura 8 - Micrografia Eletrônica de Varredura da seção transversal de TBC [15].

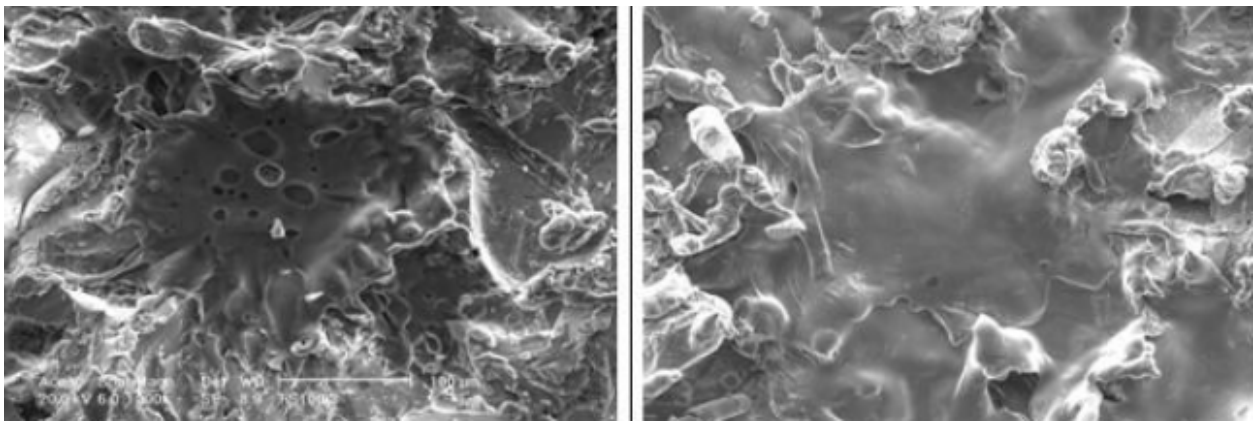
1.1.3.4. Pré-aquecimento

Nos Processos de Soldagem o pré-aquecimento é essencial nos casos que necessitam de calor de aporte alto proveniente do metal de adição, como é o caso da soldagem de peças espessas e na soldagem de materiais de alta condutividade. No primeiro caso, o calor de aporte alto é necessário para garantir uma boa penetração do cordão de solda. No segundo caso, ele também é utilizado para obter uma boa penetração e para romper as camadas protetoras de óxidos. Caso, a superfície não esteja pré-aquecida para receber esse calor, o metal de adição solidifica-se rapidamente sem fornecer a devida fusão e penetração. O pré-aquecimento só é dispensável para a soldagem de peças finas, pois não necessitam de calor de aporte alto [4, 16].

Nos Processos de Aspersão Térmica, o pré-aquecimento do substrato tem como objetivo eliminar a umidade presente na superfície, e queimar ou volatizar resíduos oleosos que eventualmente ficaram presentes na superfície, podendo ser facilmente obtido por meio da chama redutora da pistola utilizada, ao elevar a temperatura da superfície do substrato na faixa de 90° a 150°C [3, 4, 8, 16].

A utilização do pré-aquecimento consegue fornecer um melhor ancoramento das partículas aspergidas, em comparação às superfícies sem pré-aquecimento. Isto porque ele é capaz de fornecer mais calor ao processo, mantendo o calor envolvido por um tempo maior. Consequentemente, proporciona tempo suficiente para que as partículas aspergidas fundidas possam penetrar na rugosidade da superfície e resfriar-se lentamente. Caso contrário, essas partículas se solidificam rapidamente, penetrando muito pouco na rugosidade do substrato. O mesmo é observado nos Processos de Soldagem quando se deseja obter uma melhor penetração do cordão de solda [3, 4, 8, 16].

A Figura 9 mostra a superfície do revestimento formado com partículas de alumínio aspergidas em um só passe, com e sem pré-aquecimento. No item a, a superfície não apresenta o efeito de um ancoramento homogêneo com formação de panquecas de alumínio, por apresentarem muitos salpicos que acabam reduzindo a aderência. No item b há um ancoramento mais homogêneo, com pouca formação de poros e menos salpicos que não irão prejudicar a aderência, nesse caso [3].



(a) (b)

Figura 9 - Superfície do revestimento (a) Sem Pré-aquecimento (b) Com Pré-aquecimento [3].

Outra finalidade do pré-aquecimento bastante almejada tanto nos Processos de Soldagem quanto nos Processos de Aspersão, é aliviar as tensões internas. Isto só é possível com o fornecimento de mais calor envolvido durante o processo, para que, a dilatação e a contração das partículas ocorram da forma mais natural possível [3, 4, 8, 16].

1.1.3.5.Aplicação de Selantes

Alguns procedimentos realizados após o Processo de Aspersão possibilitam uma durabilidade maior para a camada de revestimento obtida, a fim de proteger tanto o substrato

como o próprio revestimento da ação corrosiva. O procedimento mais comum consiste na aplicação de um selante orgânico sobre o revestimento, tornando-se uma prática cada vez mais requisitada pelas empresas. Apesar de existir diversos fabricantes de selantes com especificações técnicas diferentes, todos devem possuir boa capacidade de penetração, para vedar poros e microtrincas existentes da camada de revestimento, e consequentemente diminuir a porosidade. Dessa maneira, ele cria uma camada sobre o revestimento, capaz de impedir a ação corrosiva do meio ao qual a peça será exposta [3, 17].

Independentemente de usar selantes a base resina ou cera, eles devem penetrar nos poros e microtrincas em seu estado líquido e endurecidos logo em seguida, seja por secagem ao ar, recozimento ou por processos catalíticos, como no caso de selantes a base de resina epóxi, poliéster ou poliuretanos. Caso os selantes sejam aplicados na forma de spray ou como pintura, o processo deve ser repetido várias vezes para assegurar total cobertura. [3, 17].

1.2. Processo de Aspersão Térmica a Arco Elétrico

O processo utilizado neste estudo é o Processo de Aspersão Térmica a Arco Elétrico (AS). Ele utiliza o calor proveniente do arco elétrico formado por diferença de potencial, a fim de fundir dois arames que se encontram no bico da pistola utilizada. Então, as partículas aspergidas fundidas são aceleradas por um jato, composto por uma mistura de ar comprimido e argônio, em direção à superfície do substrato. E após o resfriamento dessas partículas, a camada de revestimento é formada [3,18]. A Figura 10 ilustra os elementos envolvidos neste Processo.

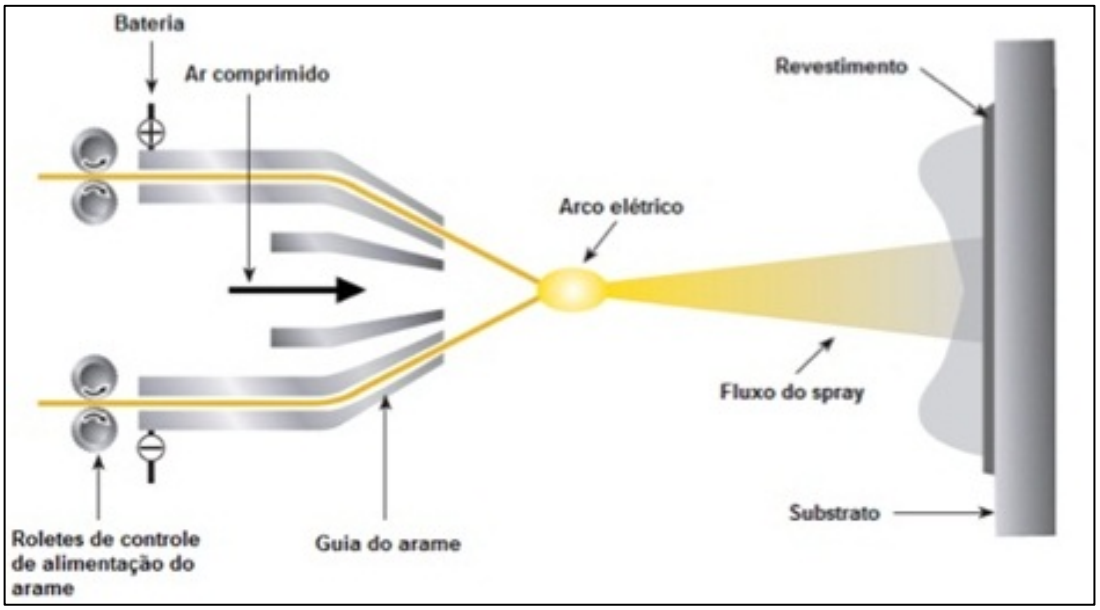


Figura 10 - Elementos Envolvidos no Processo de Aspersão Térmica a Arco Elétrico [3].

O fluxo do spray possui um volume em formato de cone, que gera um depósito irregular nas partículas aspergidas, apesar de manter sua taxa de deposição constante. As partículas do centro do cone são depositadas uniformemente sobre a superfície, por serem depositadas com um ângulo de 180°. Porém, as partículas das extremidades do cone não são uniformemente depositadas devido à angulação ser diferente de 180° graus.

O Processo pode ser efetuado utilizando técnicas diferentes, conforme o tipo de formato da superfície a ser realizado, para obter uma melhor uniformidade do depósito do fluxo do spray.

1.2.1. Técnica para Revestimento de Eixos

Nesta técnica o operador mantém a pistola imóvel e conduz a alimentação do arame automaticamente, de forma a manter a taxa do fluxo do spray constante. Ao mesmo tempo, ele mantém o eixo a ser revestido girando com o auxílio do torno mecânico. Dessa forma, a superfície do eixo recebe as partículas aspergidas uniformemente, e assim, são formadas as camadas de revestimento, conforme ilustrado pela Figura 11.



Figura 11 - Técnica de Aspersão para revestimento de Eixos (Fonte: Autora).

1.2.2. Técnica para Revestimento de Placas

Nesta técnica o operador mantém a placa a ser revestida devidamente fixada e conduz a alimentação do arame automaticamente, de forma a manter a taxa do fluxo do spray constante. Ao mesmo tempo, ele controla o posicionamento da pistola em movimentos de zig-zag horizontalmente. Dessa forma, a superfície da placa recebe as partículas aspergidas

uniformemente, e assim, são formadas as camadas de revestimento. Conforme ilustrado na Figura 12.



Figura 12 - Técnica de Aspersão para revestimento de Placas (Fonte: Autora).

1.2.3. Características do Processo

A Tabela 1 sintetiza as informações que padronizam o Processo de Soldagem a Arco Elétrico ao utilizar arames com 12 a 14% de Cromo em sua composição.

Tabela 1 - Características do Processo de Aspersão Térmica por Arco Elétrico [19].

Vazão de gases	$71m^3/h$
Temperatura média da chama na saída	5500°C
Atmosfera em torno das partículas	N_2,O_2
Velocidade de impacto das partículas	240 m/s
Aderência relativa (1 a 10)	6
Coesão interlamelar	Alta
Teor de óxidos	0.5 – 3 %
Taxa de deposição	16 Kg/h
Potência	4 – 6 kW
Energia para fusão	0.2 – 0.4 kW/kg

Neste tipo de processo, a quantidade de energia em forma de fluxo de elétrons é transmitido da pistola para os arames, permitindo uma concentração de calor maior na pistola do que no substrato. Consequentemente, haverá mais calor envolvido na fusão das partículas aspergidas antes de atingir o substrato do que no ancoramento delas, devido a uma elevada taxa de deposição do fluxo do spray de 16 kg/h [4, 16, 18].

Variações da taxa de deposição também podem ocorrer devido às variações na diferença de potencial. Isto pode gerar um aumento ou uma diminuição indesejável do comprimento do arco elétrico, que deve ser compensado de acordo com o consumo do arame para manter a taxa constante. O ideal é utilizar o sistema de auto-ajuste para fontes planas, pois esse sistema permite manter um controle automático da alimentação do arame, a fim de compensar qualquer variação no comprimento do arco elétrico. Esse tipo de sistema é muito utilizado nos Processos de Soldagem com Arame Sólido MIG/MAG [4, 16].

Por outro lado, uma taxa de deposição do fluxo do "spray" variável permite obter uma camada de revestimento com um índice de porosidade menor, com o aumento da taxa de deposição. Isto ocorre quando a diferença de potencial aumenta, o que resulta em um aumento do comprimento do arco elétrico, passando a necessitar de mais arame para ser consumido, e consequentemente, aumentando o depósito de partículas. Porém, o percentual de porosidade deve ser mantido dentro dos padrões das normas, e isto já é possível através de uma taxa de depósito constante e elevada [3, 4, 16, 18].

A velocidade de depósito das partículas aspergidas também deve ser mantida elevada, com um valor de 240 m/s. Isto proporciona uma melhor adesão devido a um impacto maior que essas partículas sofrerão, com o aumento da sua velocidade [3, 4, 16, 17, 18].

1.3. Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas de um material consistem na capacidade que este possui de reagir à ação de uma força externa, através da sua deformação [20]. Isso pode ser analisado através de experimentos laboratoriais, realizados com corpos de prova e de acordo com as especificações das suas normas.

O propósito de formar um revestimento é que ele forneça melhores propriedades mecânicas ao substrato. Dessa forma, é esperado uma melhora nas principais propriedades, como a resistência mecânica, dureza, tenacidade. Também é almejado uma proteção da ação corrosiva do meio e do desgaste do seu material. Por fim, é esperado que, caso uma eventual fratura venha a ocorrer, esta se localize entre as suas camadas de revestimento para proteger o substrato [3,7].

O resultado é um prolongamento da vida útil dos substratos revestidos, submetidos às suas devidas condições de operação.

1.3.1. Resistência Mecânica

É a capacidade que o material possui de resistir aos esforços solicitados sem que esses esforços causem deformação plásticas sobre o material, podendo ser observado por meio do limite de escoamento, da ductilidade e da dureza [20].

Aumentar a resistência mecânica de um material significa dificultar a movimentação de discordâncias, evitando que a deformação plástica ocorra. Existem maneiras de obter esse aumento desejável, tais como: pela utilização de mecanismos de endurecimento; tratamento térmico e inclusão de outros elementos químicos na microestrutura. [3, 18, 20, 21]

De qualquer forma, isto causa um aumento na dureza e no limite de escoamento ao mudar sua microestrutura. Porém, a ductilidade no material diminui, resultando na dificuldade de sofrer deformação plástica ao impedir a movimentação das discordâncias. Neste caso, o material fica sujeito a sofrer fratura ou ruptura sem apresentar deformação aparente, diferente de um material com maior ductilidade, no qual apresentará deformação plástica visível, antes de sofrer fratura ou ruptura [3, 18, 20, 21].

Nos Processos de Aspersão Térmica, possivelmente não é possível obter o aumento desejado do limite de escoamento com a mesma intensidade conseguida pelos tratamentos térmicos. Isto se deve ao fato das microestruturas obtidas nas camadas de revestimento serem bastante heterogêneas, o que formará regiões com um aumento significativo e outras com redução das mesmas [19].

Contudo, é esperado que o substrato revestido aumente a sua capacidade de sofrer deformações elásticas, devido à melhor resistência mecânica obtida com a inclusão de elementos químicos.

1.3.2. Aderência

É a capacidade que o material possui de resistir ao rompimento de suas moléculas quando este está submetido a um esforço de tração, ou seja, o material é capaz de manter suas ligações químicas. A aderência de um revestimento irá depender da espessura e do número de camadas de revestimento formados no Processo de Aspersão, pois ela consiste basicamente da adesão e da coesão entre as camadas revestidas [3,7, 20].

O ideal é que a aderência do revestimento seja reduzida em relação à do substrato, devendo ser testada através de Ensaio de Adesão (Norma ASTM D4541). Existem diferentes testes para realizar este ensaio, sendo todos eles padronizados por normas. O resultado esperado deve ser obtido com a determinação da intensidade da adesão e pela observação do local onde a fratura ocorreu [7].

O teste é considerado válido quando a adesão está dentro dos valores impostos pela norma do teste e quando a fratura ocorre nas camadas de revestimento, sendo aceitável ocorrer na interface do revestimento com o substrato. Caso a fratura ocorra no interior do adesivo utilizado durante o teste, este é considerado sem validade, e outro tipo de teste será efetuado [7].

1.3.3. Dureza

É a propriedade mecânica que um material possui de resistir à deformação plástica [20].

No Processo de Aspersão Térmica, o aumento da dureza irá depender da espessura e do número de camadas formadas no revestimento. O ideal é que esse aumento seja devido a inclusões metálicas de elementos químicos, formando uma microestrutura com uma dureza maior do que a do substrato, em vez, desse aumento ser ocasionado pela formação de óxidos, pois neste caso a microestrutura formada é fragilizada [7, 18].

A dureza é mais comumente medida através de Ensaio de Microdureza e Macrodureza Vickers, conforme os parâmetros da Norma ASTM E384 [22], ao utilizar um pequeno penetrador para realizar uma impressão sobre a superfície a ser analisada.

1.3.4. Tenacidade

É a capacidade que um material possui de absorver energia, resistindo à fratura. Para que um material metálico seja considerado tenaz, é necessário apresentar uma boa relação entre a sua resistência mecânica e sua ductilidade [20].

Nos Processos de Aspersão Térmica, a formação de camadas de revestimento sobre o substrato significa uma melhora na resistência mecânica em relação às condições anteriores do substrato. Porém a intensidade da ductilidade dependerá da microestrutura formada, tendendo a ser reduzida.

Isto significa que o revestimento sofrerá menos riscos à fratura devido ao aumento da sua dureza. Porém sua capacidade de absorver energia será menor, quando submetido a tensões maiores, resultando em uma possível fratura nas camadas do revestimento ou na interface

substrato-revestimento. Isto de fato é almejado nos Processos de Aspersão Térmica, justamente por preservar a integridade do substrato quando este é submetido às tensões elevadas [20].

1.3.5. Resistência ao Desgaste

O desgaste de um material é a sua perda gradativa, devido ao contato com outro metal, substância abrasiva, líquido ou vapor [20].

A resistência ao desgaste do substrato revestido é melhorada em condições que dificultam o contato e a posterior penetração de outro material. Isso pode ser obtido com o acabamento superficial, que resulta na diminuição do atrito entre os materiais, ao fornecer um aspecto liso e plano para a superfície revestida [18].

Entretanto, o ideal é obter camadas de revestimento de elevada dureza devido à inclusão de elementos químicos durante a sua formação, como pode ser observado pela Tabela 2 [18].

Tabela 2 - Elementos químicos utilizados para melhorar a Resistência ao Desgaste [21].

ELEMENTOS	TEOR MÁXIMO
Carbono	Com a formação de carbetos, ou martensita ou perlita
Manganês	Inferior a 0,5 %
Tungstênio	12 – 20 %
Alumínio	Necessita do Nitrogênio para formar Nitreto de alumínio (AlN).

1.3.6. Resistência à Corrosão

A corrosão do material consiste no ataque à superfície, devido à influência do meio ao qual o material está submetido. O meio pode ser químico, líquido ou gasoso e é capaz de formar óxidos ou sais sobre a superfície do material, degradando-o [20].

Uma das maneiras de melhorar a resistência à corrosão de um material é aplicar camadas protetoras sobre a sua superfície [18].

A resistência à corrosão de um substrato é melhorada com a formação das camadas de revestimento. Elas passam a ser consideradas como uma camada protetora da sua superfície, ao fornecer uma microestrutura susceptível ao aumento da resistência à corrosão, devido à inclusão de elementos químicos. Esses elementos podem ser encontrados na Tabela 3, sendo capazes de melhorar essa resistência ao atingir seus respectivos teores máximos.

Tabela 3 - Elementos químicos utilizados para melhorar a Resistência à Corrosão [21].

ELEMENTOS	TEOR MÁXIMO	TIPO DE MATERIAL METÁLICO
Cromo	12 %	Sem restrições
Níquel	12 – 20 %	Em aços de baixo teor de carbono
Molibdênio	0,3 %	Sem restrições
Vanádio	0,03 – 0,25 %	Sem restrições
Silício	2 %	Em confecção de molas
Boro	0,001 – 0,003 %	Sem restrições
Fósforo	0,04 – 0,025 %	Sem restrições
Titânio e Nióbio	Pequeno	Impedem o empobrecimento de cromo

1.4. Microestrutura do Revestimento

A microestrutura formada no revestimento é heterogênea apesar da taxa de deposição do fluxo de spray ser constante e elevada. Isto se deve à não existência de uma uniformidade superficial necessária para melhorar a adesão, e impede que o impacto das partículas aspergidas seja uniforme. As partículas aspergidas sofrem uma reação com os gases durante o processo e uma reação com a atmosfera em contato com o material líquido, sendo completamente diferente da estrutura e da química do material em seu estado original, em formato de pó ou arame [3].

A Figura 13 ilustra a formação de poros, inclusões não metálicas (óxidos), inclusões metálicas (partículas aderidas com estrutura lamelar), e partículas não fundidas de estrutura esferoidizada, encontradas nas camadas de revestimento [3, 8].

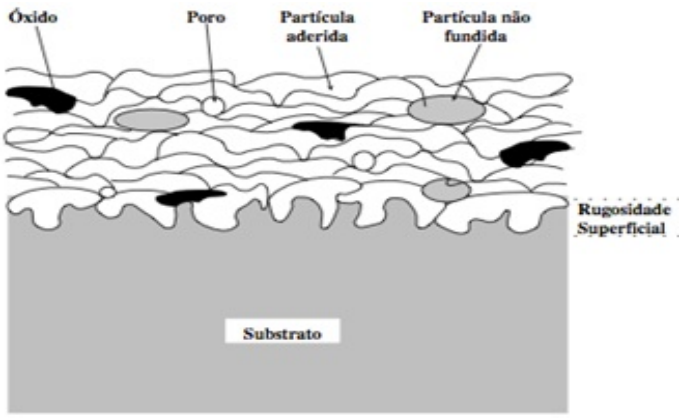


Figura 13 - Desenho da Seção Transversal do revestimento formado por Aspersão [3].

1.4.1. Óxidos

Os óxidos são um tipo de inclusão não metálica formados devido à reação das partículas aspergidas com ar ou oxigênio que ocorre durante o processo. Eles se encontram no revestimento caracterizados por pontos pretos, e podem ser vistos na seção transversal do revestimento, paralelos ao substrato, através da Microscopia Óptica [8].

Os teores de óxido variam de 2,5% e 15% nos Processos Aspersão. Seu valor excessivo é responsável pelo aumento da dureza do revestimento, porém forma uma microestrutura frágil. Esse aumento excessivo também diminui a adesão e coesão, e aumenta a porosidade do revestimento. Portanto, uma maneira de evitar a formação de óxidos é incluir elementos químicos, que possuam uma ação antioxidante, como por exemplo, o silício [3,8].

1.4.2. Poros

A porosidade é caracterizada por vazios existentes na microestrutura, capaz de permitir a penetração de líquidos e gases por esses vazios, acelerando a degradação do revestimento. Ela é responsável pela propagação de trinca quando microtrincas surgem na estrutura do revestimento e afeta as propriedades mecânicas, como condutividade térmica e elétrica, e o modulo de elasticidade, reduzindo seus valores com o aumento da quantidade de poros [3,8].

Os principais fatores que influenciam a presença e a quantidade de porosidade são o gás de arraste utilizado, a distância da tocha ao substrato, o pré-aquecimento do substrato, o material utilizado como revestimento, as condições de aspersão e a preparação da superfície. No caso de utilização de ar, há um risco de acréscimo de porosidade no revestimento. Quanto à distância de aspersão, a porosidade possuí uma tendência a diminuir quando são utilizadas menores distâncias. O pré-aquecimento do substrato pode fornecer melhores resultados, como mencionado anteriormente, pois reduz o surgimento de porosidades [3,8].

De uma maneira geral, os revestimentos aspergidos possuem uma variação do índice de porosidade de 5 a 15%, devido a elevada taxa de deposito das partículas aspergidas [3, 14]. Normalmente, nos Processos de Aspersão Térmica por Arco Elétrico, é possível obter valores menores e aceitáveis de porosidade devido ao deposito das partículas aspergidas serem feitos em fluxo de spray com formato cônico. E a aplicação de selantes pode reduzir ainda mais o índice de porosidade, independentemente do tipo de processo utilizado.

1.4.3. Partículas Aderidas de Estrutura lamelar

Uma estrutura lamelar é caracterizada pela forte ligação entre seus átomos em duas direções, formando lamelas, e fracamente ligados em uma direção perpendicular a essas lamelas. Esse tipo de estrutura é comumente obtido através de tratamento térmico dos em aços carbono, que são submetidos a temperaturas e taxas de difusão elevadas para que os átomos de carbono possam se difundir sobre longas distâncias. Dessa forma, lamelas mais grossas podem ser formadas. Então, elas passam a ter sua espessura reduzida, conforme a variação da velocidade de resfriamento a que serão submetidas [3,8].

A estrutura lamelar formada pelo Processo de Aspersão Térmica se origina com a fundição das partículas aspergidas. Elas permanecem neste estado até aderirem à superfície do substrato, e formam camadas finas de aspecto lamelar representando inclusões metálicas, conforme o seu resfriamento se inicia [3,8].

Contudo, é necessário que os procedimentos anteriores ao Processo de Aspersão Térmica sejam devidamente realizados, para que a adesão não fique prejudicada. Caso contrário, pode haver a inclusão de óxidos, carbonetos, e compósitos na estrutura lamelar, formando inclusões não metálicas [3,8].

1.4.4. Partículas Não Fundidas de Estrutura Esferoidizada

A fundição das partículas aspergidas pode não ocorrer de maneira desejada, resultando na formação de partículas não fundidas de estrutura esferoidizada. Isso acontece devido às pequenas mudanças nos parâmetros utilizados no Processo de Aspersão Térmica, como velocidade de impacto, temperatura de fundição, temperatura de resfriamento, posição do operador da aspersão, entre outros fatores. Este tipo de estrutura formada fragiliza o revestimento, pois a estrutura esferoidizada é mais propícia à propagação de trincas do que uma estrutura lamelar [3, 8].

1.4.5. Microtrincas

As microtrincas em revestimento cerâmicos podem ser aceitáveis, pois apresentam uma fina camada de trincas perpendiculares ao plano de lamelas. Elas permitem a deformação sob tensões térmicas, elevando a tolerância de deformação e resistência à fadiga [15].

Nos demais materiais, elas são indesejáveis e são formadas devido ao resfriamento da camada de revestimento, que causa acúmulo de tensão residual e uma microestrutura susceptível a sua propagação [3, 8]

Capítulo 2 – Metodologia

Este Capítulo foi destinado a detalhar os procedimentos experimentais com substratos revestidos pelo Processo de Aspersão Térmica a Arco Elétrico (AS). O estudo foi desenvolvido a partir de corpos de prova fabricados pela Empresa VGK Engenharia [19], cujas informações, referentes às características dos materiais utilizados, foram analisadas para servir como base do estudo.

Em seguida, foi realizado o preparo de sete amostras para que esses modelos pudessem ser testados experimentalmente. Tais experimentos foram efetuados por meio de: Microscopia Óptica (MO), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Ensaio de Dureza Vickers e Análise da Porosidade por processamento digital de imagens (PDI).

2.1. Características dos Materiais

2.1.1. Substrato

O material utilizado como substrato foi o Aço Carbono SAE 1020, cuja composição química encontra-se especificada na Tabela 4. Sua composição indica que o aço possui um baixo teor de C e de outros elementos residuais, estando de acordo com a composição estabelecida pela Norma ABNT 1020/NBR 6006 (Aço SAE 1020) [21]. Ele é um dos aços mais utilizado no mercado devido a sua alta tenacidade e baixa dureza, fácil usinagem, e excelente forjabilidade e soldabilidade, sendo soldável por qualquer processo a gás, arco ou resistência.

Tabela 4 - Composição química do substrato [19].

ELEMENTOS QUÍMICOS	TEOR ANALISADO	TEOR ESPECIFICADO POR NORMA
Carbono	0,18-0,23 %	0,18-0,23 %
Manganês	0,3-0,6 %	0,6 %
Fósforo	0,04 %	0,04 %
Enxofre	0,05 %	0,05 %

O preparo da superfície do substrato foi feito através do jateamento abrasivo para remover os contaminantes e fornecer a texturização da superfície [19].

2.1.2. Arames

O arame utilizado no processo era composto de um material ferroso cuja composição química pode ser observada pela Tabela 5. Tal composição química tem como objetivo aumentar a resistência à corrosão devido à presença do Cr e seu médio teor de C, devido à alta dureza proveniente de a aplicação resultar em têmpera das partículas aspergidas [23, 24].

Tabela 5 - Composição dos arames no Processo Aspersão Térmica a Arco Elétrico [19].

ELEMENTOS QUÍMICOS	TEOR
Carbono	0,3%
Fósforo	Traços
Enxofre	Traços
Manganês	1,0%
Níquel	1,0%
Cromo	12-14%
Silício	0,08%
Ferro	Balanceado

É possível observar que a composição dos arames se assemelha à composição de um Aço AISI 420 (0,15-0,4% C; 12-14% Cr) [23]. A otimização das propriedades e a formação de uma microestrutura martensítica desse tipo de aço, dependem do objetivo e do tipo de tratamento térmico realizado. Normalmente, utiliza-se a têmpera e o revenido com o objetivo de controlar sua dureza na faixa de 44 até 58HRc, mas isso pode acabar prejudicando a posterior usinagem. Esses tratamentos térmicos também geram um desbalanceamento na resistência à corrosão, na tenacidade e no acúmulo de tensões residuais, não sendo possível compatibilizar, por exemplo, máxima resistência à corrosão e menor dureza, ou, menor tensão residual e máxima tenacidade [23, 24].

Dessa forma, deseja-se obter camadas de revestimento com propriedades semelhantes a aquelas encontradas no Aço AISI 420, mas sem que a elevação da resistência à corrosão fique prejudicada com o aumento da dureza. As propriedades físicas dos arames serviram como base para o controle dos parâmetros envolvidos no processo, para que o revestimento tenha propriedades físicas próximas às do arame, como podem ser observadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Propriedades Físicas dos arames [19].

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

2.1.3. Preparação dos Corpos de Prova

A seleção de corpos de prova com formatos diferentes foi feita para analisar a influência que esses formatos teriam sobre as propriedades e microestrutura do revestimento. Dessa forma, optou-se pela seleção de eixos e placas, conforme a Figura 14.

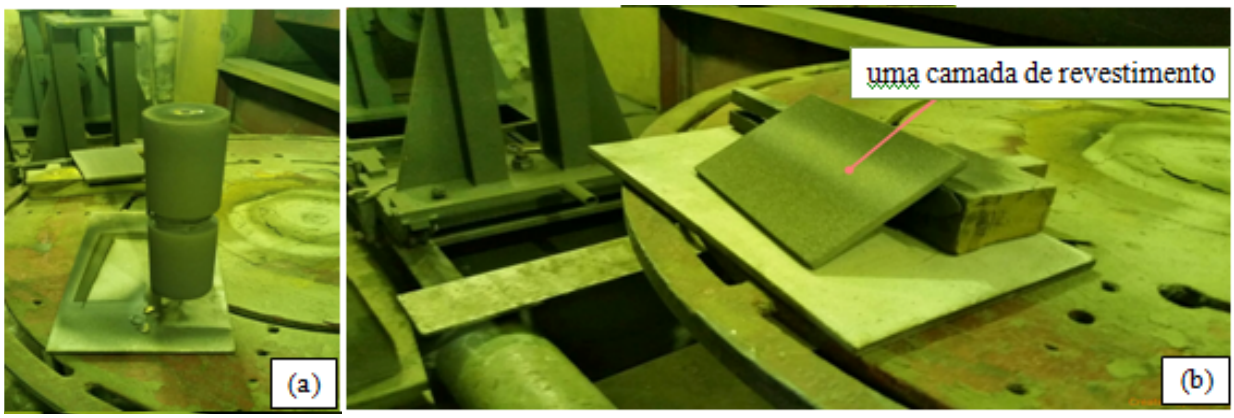


Figura 14 - Elementos selecionados (a) Eixo sem revestimento; (b) Placa com aplicação de apenas uma camada de revestimento.

A pressão do jato foi mantida alta, mantendo o controle do seu valor na faixa de 40 psi a fim de obter camadas de revestimento com uma fina texturização, em vez de utilizar uma pressão mais baixa para obter uma texturização áspera. Essa pressão foi aumentada mais ainda para um valor de 60 psi no final das últimas camadas formadas com a finalidade de aumentar a dureza, sendo esta, estimada em R_{15} 80-82 (R_c40-43) [19].

Durante todo o processo procurou-se manter a força de impacto das partículas aspergidas de 60N para formar uma camada de revestimento de aproximadamente 1 mm de espessura nos dois tipos de corpos de prova. A única diferença foi devido à técnica utilizada, que variava a posição da pistola conforme variava a posição dos elementos, ou seja, ou a pistola era mantida fixa enquanto o eixo era girado, ou a pistola era manuseada pelo operador enquanto a placa permanecia fixa [19].

2.1.3.1 Eixos

Dois eixos foram fabricados e passaram pelo processo de retificação para obter um acabamento superficial mais liso e uniforme. Esse processo gerou uma perda de material revestido, que pode ser quantificada através da observação da Tabela 7, onde as espessuras das camadas de revestimento foram reduzidas de no Eixo 1 de 0,85 mm para 0,645 mm e no Eixo 4 de 1,01 mm para 0,82 mm.

Tabela 7 - Especificações dos Eixos [19].

NÚMERO	MEDIDA BASE	MEDIDA APÓS ASPERSÃO	MEDIDA RETIFICADA	SELANTE
1	62,10/00mm	63,80mm	63,39/36mm	Selante 2
4	64,83/82mm	66,85mm	66,47/45mm	Selante 1

2.1.3.2. Placas

Duas placas foram fabricadas, sendo que ambas receberam uma aplicação de Resina Epóxi depois da aplicação do revestimento nas suas superfícies, como pode ser observado pela Figura 15.

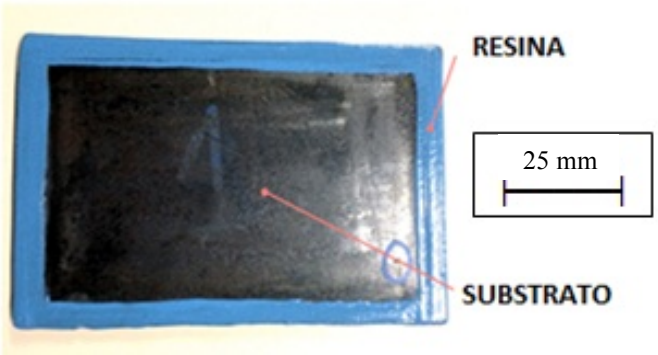


Figura 15 - Placa com aplicação de Resina.

A finalidade é proteger as laterais da amostra da ação corrosiva do meio durante uma análise de corrosão, pois essa área é uma região propícia a maior corrosão podendo afetar os resultados da análise. Neste trabalho não foi realizado essa análise.

A Tabela 8 contém as especificações das placas utilizadas, sendo que nestes casos, o processo de retificação não foi aplicado.

Tabela 8 - Especificações das Placas [19].

NÚMERO	MEDIDA BASE	ACABAMENTO	SELANTE
1	100mm x 150mm x 4,5mm	Resina Epóxi	Selante 1
6	100mm x 150mm x 4,5mm	Resina Epóxi	Selante 2

2.1.3.3. Selantes

Após a realização do processo, os corpos de provas foram resfriados à temperatura ambiente para a posterior aplicação do selante. No item a da Figura 16 observa-se uma diferença visual na superfície da placa, sendo possível diferenciar a região que possui o selante da região sem selante. O mesmo ocorre no item b, onde essa diferença é observada no lado esquerdo do eixo, além da representação do eixo usinado antes da realização do Processo pelo lado direito do eixo.

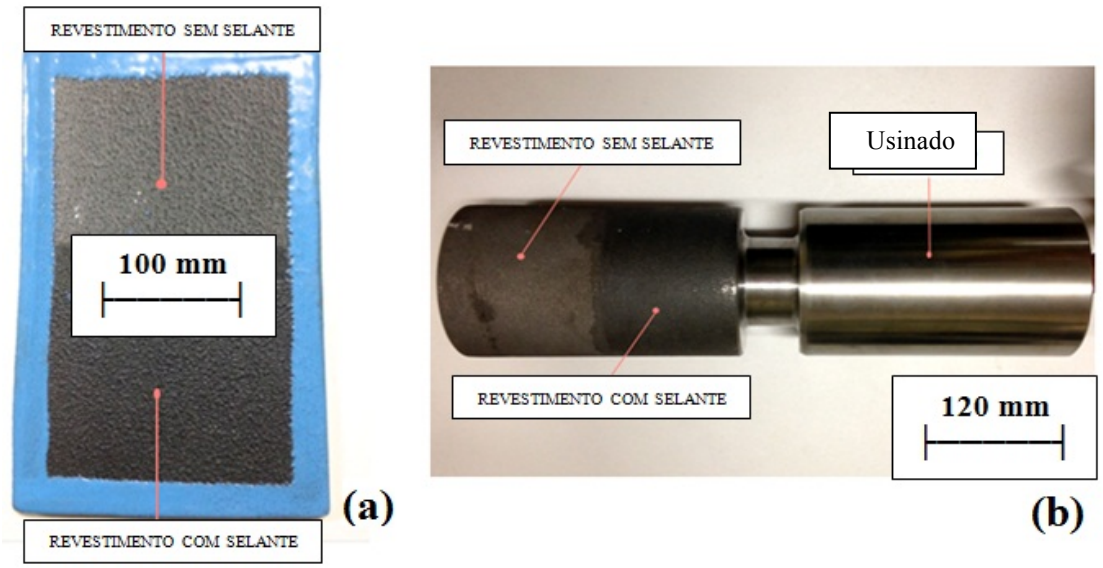


Figura 16 - Aplicação de Selantes. (a) Placa; (b) Eixo.

A aplicação do Selante foi realizada com dois selantes de composição e características diferentes, como pode ser observado na Tabela 9. Essa escolha tem como objetivo, o de verificar como as particularidades de cada selante podem afetar a sua penetração na camada de revestimento. De forma que, quanto maior for a penetração do selante, menor será o percentual de porosidade no revestimento [3,8]. Logo, é esperado obter uma redução do índice de porosidade com o preenchimento dos poros pelo selante, resultando em um balanceamento entre o aumento da resistência a corrosão, juntamente com o aumento de dureza.

Tabela 9 - Características dos Selantes [19].

SELANTE	Selante 1	Selante 2
COMPOSIÇÃO	Tinta em dois componentes, a base de Resina Epóxi Curada com Poliamida	Copolímero em meios solventes orgânicos Componentes Perigosos: Butanona (19,5%); Etila acetato (27,5%); Acetona (44%)
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS	Massa Específica a 25^{o} C: 1,45 g/cm3 Sólidos por volume: 51% Ponto de fulgor: 26°C Aspecto da película: semibrilhante	Pressão do vapor: 233Mbar Densidade: 0,85 g/cm^{3} Ponto de ebulição: 56 °C Conteúdo de material solvente: 91 Viscosidade: 13 s (4mm) Temperatura de inflamação: 460^{o} C

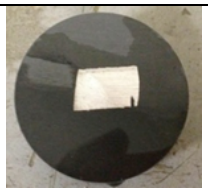
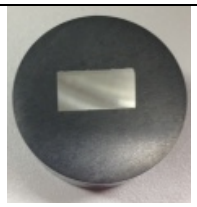
O selante 1 foi catalizado na proporção recomendada pelo fabricante e diluído com adição de 30% do volume de solvente, baixando a viscosidade original para uma maior penetração e o método de aplicação foi por pincelamento contínuo em temperatura ambiente.

O selante 2 foi utilizado sem a necessidade de diluição e o método de aplicação foi por pincelamento contínuo em temperatura ambiente.

2.2. Preparo das Amostras

A Tabela 10 enumera as sete amostras fabricadas, a partir dos corpos de prova obtidos com os eixos e placas revestidos, para serem utilizadas nos testes experimentais.

Tabela 10 - Amostras dos Eixos e Placas.

AMOSTRA	ORIGEM	SELANTE	IMAGEM
1	Eixo 1	Selante 2	
2	Eixo 4	Selante 1 Verniz - Tinta	
3	Placa 1	Selante 1 Verniz - Tinta	
4	Placa 6	Selante 2	
5	Placa 1	Selante 1 Verniz - Tinta	
6	Placa 6	Selante 2	
7	Placa 1	Sem Selante	

O preparo das amostras de 1 a 4 consistiu em cortar, embutir, lixar, polir e limpar.

As amostras 5 e 6 foram preparadas com o propósito de analisar a diferença de penetração entre os dois selantes. A perda parcial do selante foi mantida a um nível mínimo durante os seus preparos, para que a análise fosse corretamente realizada. Portanto, essas amostras não foram embutidas e nem lixadas e polidas.

A amostra 7 foi preparada para a realização do Teste de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Ela foi devidamente cortada, lixada e polida, mas não sofreu o embutimento.

2.2.1. Corte das Amostras

Os cortes foram efetuados no sentido transversal com disco de dureza de 50 HRc, pela máquina de corte Modelo COR-80, conforme mostrado na Figura 17.



Figura 17 - Corte (a) Máquina de Corte COR-80; (b) Corte Transversal sendo realizado.

Esse foi o primeiro passo do preparo das amostras, onde foi obtida uma medida aproximada de 30 x 7 x 7 milímetros, conforme ilustrado na Figura 18.

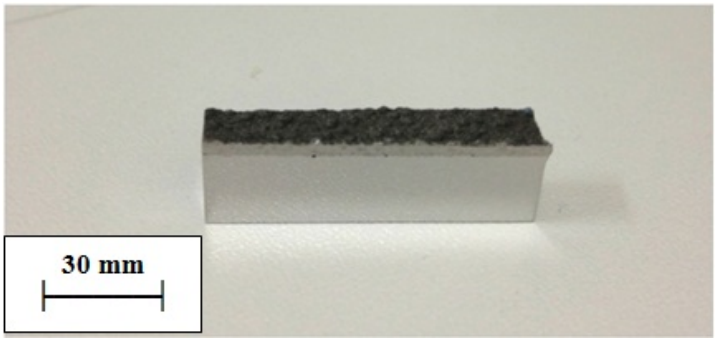


Figura 18 - Amostra 5, devidamente cortada para metalografia.

2.2.2. Embutimento

A etapa seguinte consistiu no embutimento das amostras cortadas em um baquelite, com o intuito de mantê-las em uma posição estável durante a realização dos testes, e assim, fornecer mais precisão nas medições efetuadas. O processo de embutimento foi efetuado na Máquina AROTEC Modelo PRE-30, ilustrada na Figura 19. No interior do equipamento ocorreram as

etapas de aquecimento, prensamento (150kgf/cm^2) e resfriamento (a água). O material utilizado na confecção do baquelite foi Resina Fenólica Polyfast.



Figura 19 - Máquina de embutir AROTEC, Modelo PRE-30.

2.2.3. Lixar e Polir

O primeiro acabamento superficial foi realizado com o uso de lixas, obedecendo à ordem crescente de sua granulometria, ou seja, da mais áspera para a mais fina, conforme ilustrado na Figura 20.



Figura 20 - Lixas usadas na ordem crescente de granulometria: 100, 220, 320, 400, 500, 600.

Em seguida, o polimento foi efetuado com lixas de 6µm, 3µm e 1µm, utilizando pasta de diamante como abrasivo.

Todo o processo de lixar e polir foi realizado no equipamento ARATEC AROPOL 2V, conforme ilustrado na Figura 21.

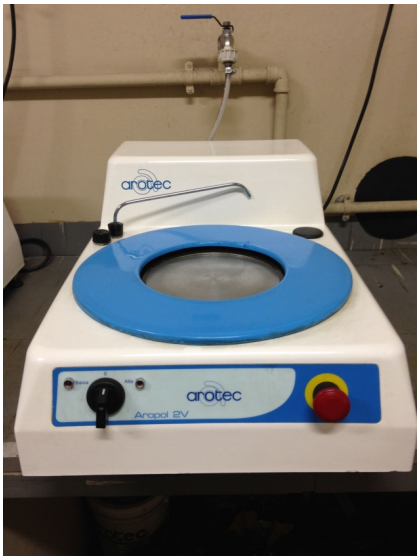


Figura 21 - Equipamento ARATEC AROPOL 2V.

2.3. Microscopia Óptica (MO)

O Microscópio Óptico de Modelo BX60MF, ilustrado na Figura 22, permitiu a obtenção de micrografias retiradas da parte central do revestimento das amostras, sendo 1 microscopia para cada amostra analisada e com aumento da microestrutura de 100, 200 e 500x.

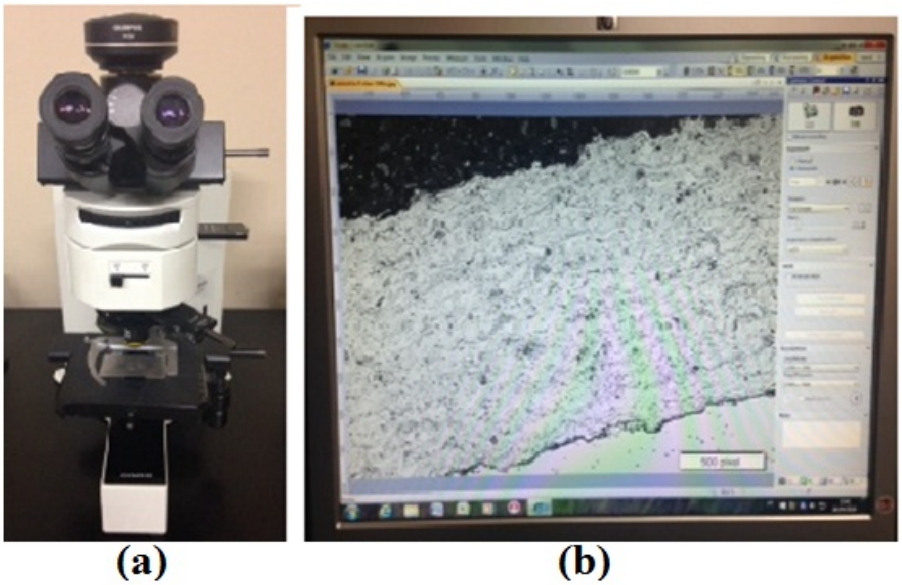


Figura 22 - LAMAT, CEFET-RJ (a) Microscópio Óptico; (b) "Software Material Extension".

Dessa forma, é possível identificar na Figura 23, as regiões onde se localizam o baquelite, a camada de revestimento e o substrato para realizar a análise microestrutural das camadas de revestimento.

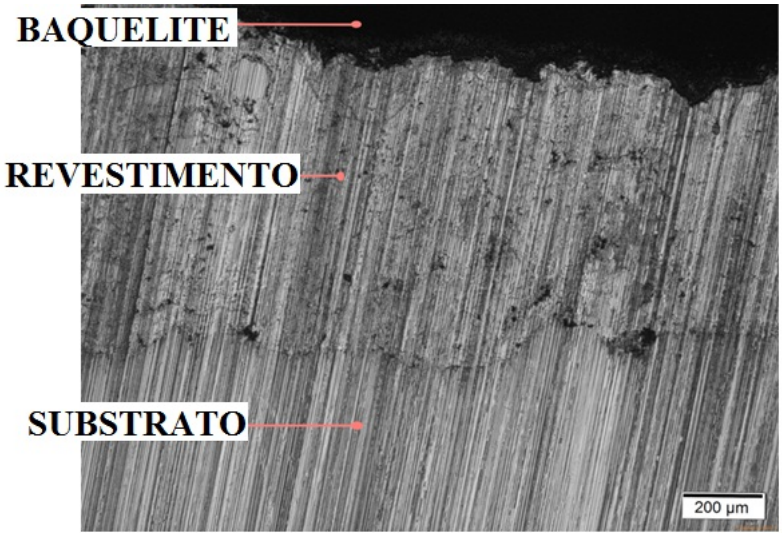


Figura 23 - Micrografia obtida da Amostra 4, sem acabamento superficial.

2.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) de Modelo 688A 1SS JEOL (20 kV), ilustrado na Figura 24, permitiu a obtenção de micrografias das amostras analisadas com mais precisão e com aumento da microestrutura de 100x e de 500x.

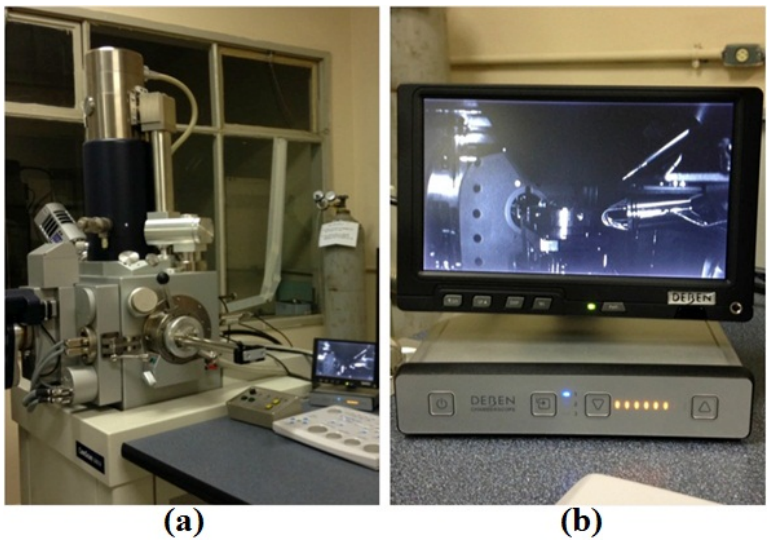


Figura 24 - Laboratório do CEFET-RJ. (a) MEV; (b) Imagem do vídeo obtido.

Também foi utilizado a técnica de EDS para obter uma análise química semi-qualitativa de elementos químicos presentes, visto que essa técnica permite obter somente dados referentes ao peso, atomicidade e energia dos elementos químicos presentes na microestrutura analisada.

2.5. Ensaio de Microdureza Vickers

A dureza do revestimento foi obtida experimentalmente pelo Ensaio de Microdureza Vickers, utilizando o Equipamento Microdurômetro de Modelo 422 MVD, ilustrado na Figura 25.

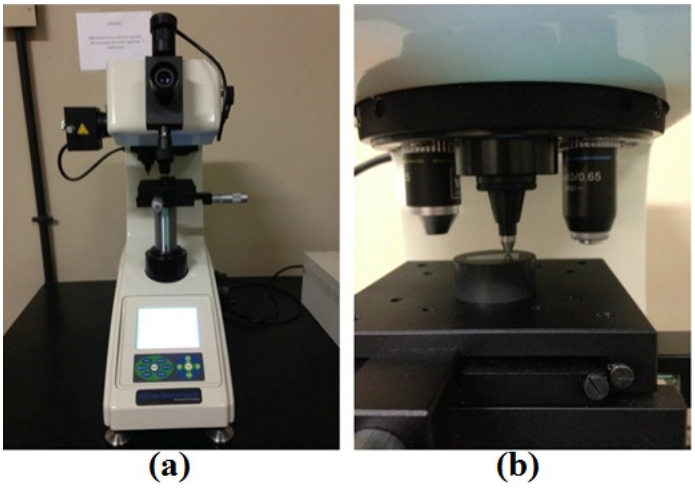


Figura 25 - Ensaio de Dureza (a) Durômetro; (b) Medição realizada para a determinação da Microdureza Vickers.

Durante o experimento, as camadas de revestimentos das amostras foram submetidas à uma força constante de 4,9 N (4900 mN) durante 5s, impostas pelo penetrador do Microdurômetro. Efetuou-se um total de doze indentações, compostas de três linhas e quatro colunas para cada amostra, conforme a Figura 26.

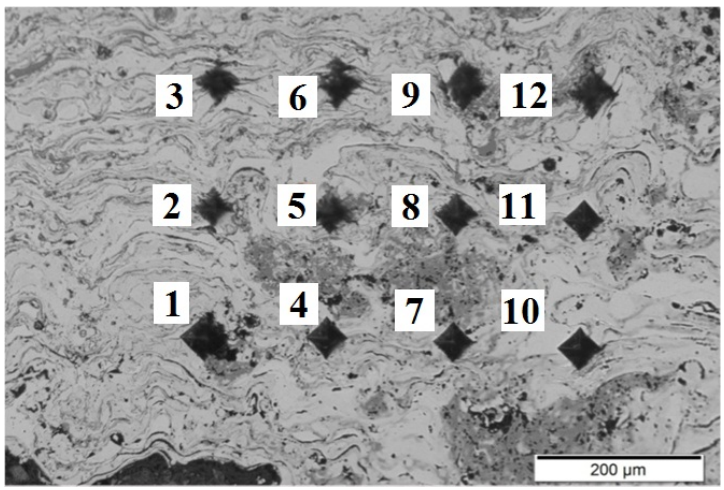


Figura 26 - Representação das doze Indentações realizadas na camada de revestimento da Amostra 3, Placa com Selante 1.

Durante as medições, tomou-se o cuidado de manter o mesmo espaçamento de 150 µm entre as indentações efetuadas, tanto no eixo vertical quanto no horizontal, e de manter a superfície das amostras analisadas, devidamente polidas e limpas. A calibração do Microdurômetro foi realizada, para que as medições fossem efetuadas a partir do zero, conforme ilustrado na Figura 27.



Figura 27 - Calibração do Microdurômetro para realização das medições.

2.6. Análise de Defeitos por Processamento Digital de Imagens (PDI)

Os defeitos presentes na microestrutura do revestimento consistem em inclusões não-metálicas (óxidos), microtrincas e poros, onde podem ser observados através das micrografias obtidas. Dessa forma, a análise de defeitos realizada por Processamento Digital de Imagens (PDI) é realizada com a finalidade de quantificar os defeitos ocasionados por vazios, que representam os poros, pois esse método permite diferenciar óxidos, microtrincas e poros em regiões selecionadas aleatoriamente nas amostras, através da realização de 4 etapas (pré-processamento, segmentação, pós-processamento e extração de atributos) [25].

Dessa forma, foi obtido para cada amostra, um total de 10 micrografias com aumento de 500x por meio da Microscopia Óptica a fim de serem analisadas pelo Software FIJI ImageJ 1.49k ilustrado na Figura 28.

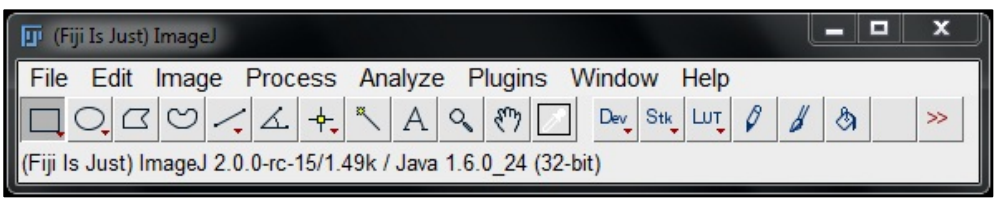


Figura 28 - Software FIJI ImageJ 1.49k.

O Processamento Digital de Imagem (PDI) necessita que a entrada e a saída de seus dados sejam necessariamente imagens para realizar a análise pelo Software, conforme a ilustração da Figura 29.

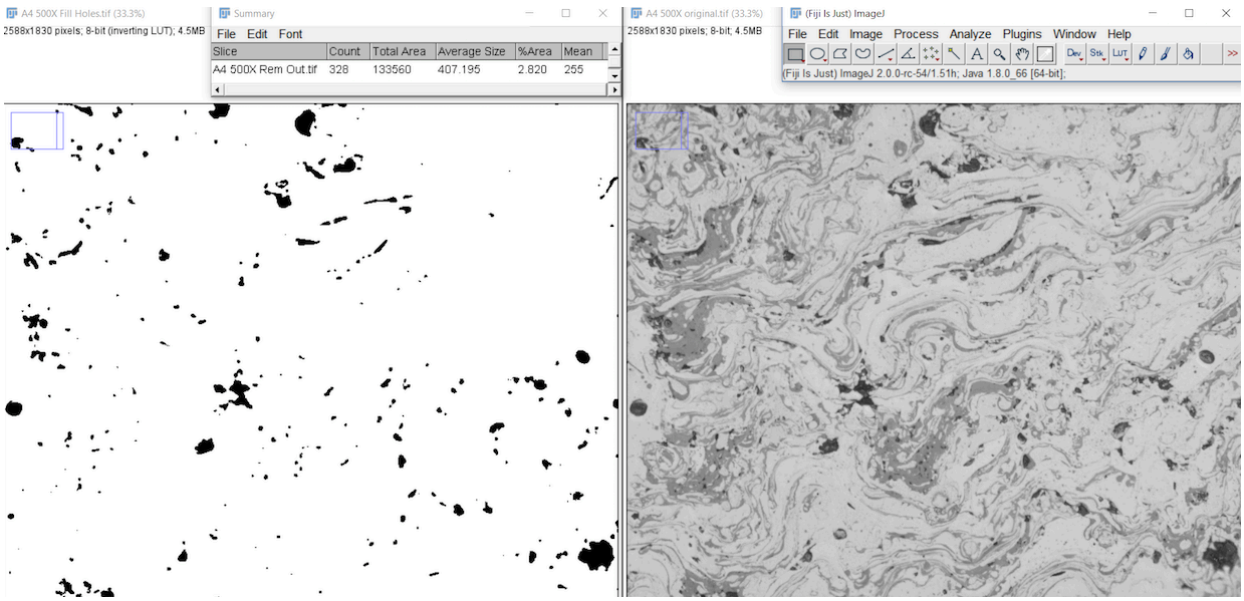


Figura 29 - Imagem Tratada no Software FIJI.

Então, as micrografias foram ajustadas para obter imagens com tamanho na escala Typical Grayscale (2588x1830 pixel, 8 bits, 4,5 Mb) e com formato TIFF. Sendo esse formato, comumente escolhido por ser bastante flexível, por aceitar a maioria dos pixels, e por ser de fácil leitura em computadores com diferentes sistemas operacionais e de fácil compressão de arquivo (RLE, LZM, JPEG, JBIG).

Seguido da correção dos seus principais defeitos com o uso das ferramentas do Software. Por fim, os defeitos são calculados e extraídos na forma de uma matriz, permitindo fornecer os seguintes resultados [25]:

- A porcentagem de área correspondente aos elementos segmentados.
- As regiões que foram contabilizadas, dentro da imagem original, permitindo uma comparação e avaliação do resultado obtido.
- Os resultados de cada elemento, obtendo-se a sua quantificação e qualificação, de acordo principalmente, com a sua área e perímetro.
- A numeração de todos os elementos segmentados, dentro de uma mesma imagem.

Capítulo 3 – Resultados

Serão apresentados nesse capítulo os resultados experimentais obtidos com os testes realizados em laboratório e as discussões geradas com os dados obtidos.

3.1. Microscopia Óptica (MO)

As micrografias obtidas permitiram analisar a microestrutura formada no revestimento para identificar as inclusões metálicas e não metálicas, o aspecto dos poros, microtrincas e a sua estrutura lamelar, caracterizando um material heterogêneo.

Inicialmente, as inclusões metálicas foram analisadas conforme os parâmetros estabelecidos na Norma ASTM E45 [26], que estabelece um formato de camadas alongadas escuras para a formação de inclusões metálicas. A norma também estabelece um aspecto alongado claro ou pontos pretos para indicar a formação de inclusões não metálicas, que podem ser classificadas em Tipo A (Sulfetos), Tipo B (Alumina), Tipo C (Silicatos) e Tipo D (óxidos), conforme ilustrado na Figura 30.

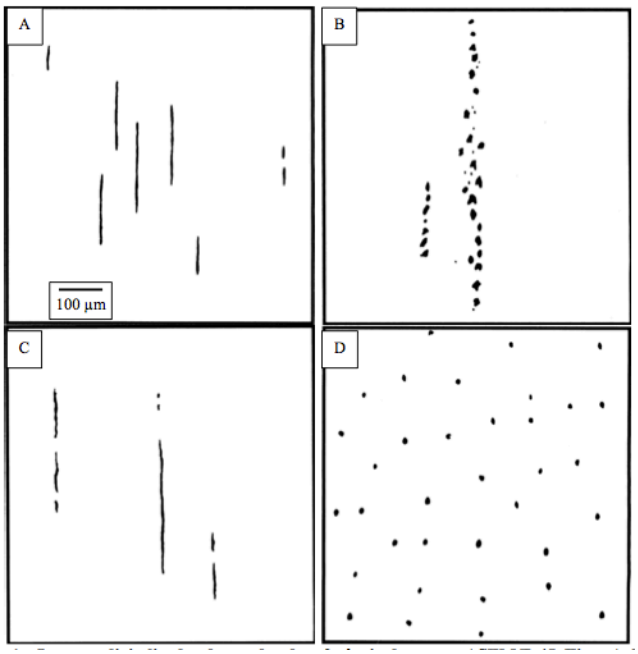


Figura 30 - Classificação das Inclusões conforme a Norma ASTM E 45 [26].

Em seguida, o aspecto dos poros existentes foi analisado somente para identificar os tipos de poros presentes, sendo necessário realizar uma Análise de Defeitos para quantifica-los. A

Figura 31 ilustra os sete tipos de poros que podem ser formados no revestimento pelo Processo de Aspersão Térmica, conforme o Estudo de VREIJLING [27].

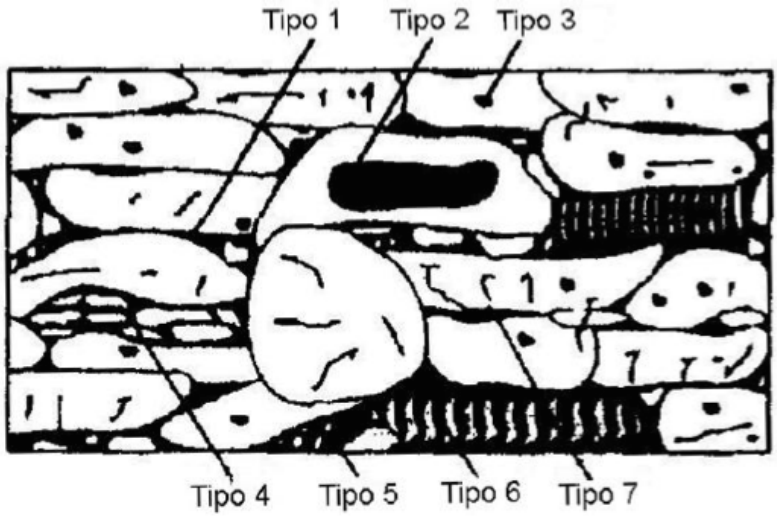


Figura 31 - Tipos de Porosidade [27].

- Tipo 1: porosidade interlamelar. Este tipo de porosidade é causado pelo empilhamento das lamelas, podendo estar relacionado ao tamanho da partícula aspergida e à distribuição do material de alimentação.
- Tipo 2: porosidade formada por bolsas de gás preso, oriundas da turbulência do fluxo de gás durante o processo de aspersão.
- Tipo 3: porosidade em forma de bolhas de gás causada pela dissolução do gás no metal fundido, que evaporam com a solidificação do metal depositado.
- Tipo 4: porosidade causada pela desintegração de partículas sólidas após o impacto.
- Tipo 5: porosidade causada pela condensação de partículas parcialmente evaporadas. Neste caso, geralmente há resíduos de pó nos poros.
- Tipo 6: porosidade resultante da formação de dendritas na solidificação, o que causa uma descontinuidade na estrutura do revestimento.
- Tipo 7: porosidades em forma de microtrincas, independentemente de sua origem de formação.

Em seguida, foi possível realizar uma comparação entre as imagens que representam as inclusões não metálicas da Figura IV.1 e as que representam os tipos de poros da Figura IV.2, com as micrografias representadas nas Figuras 32 a 35.

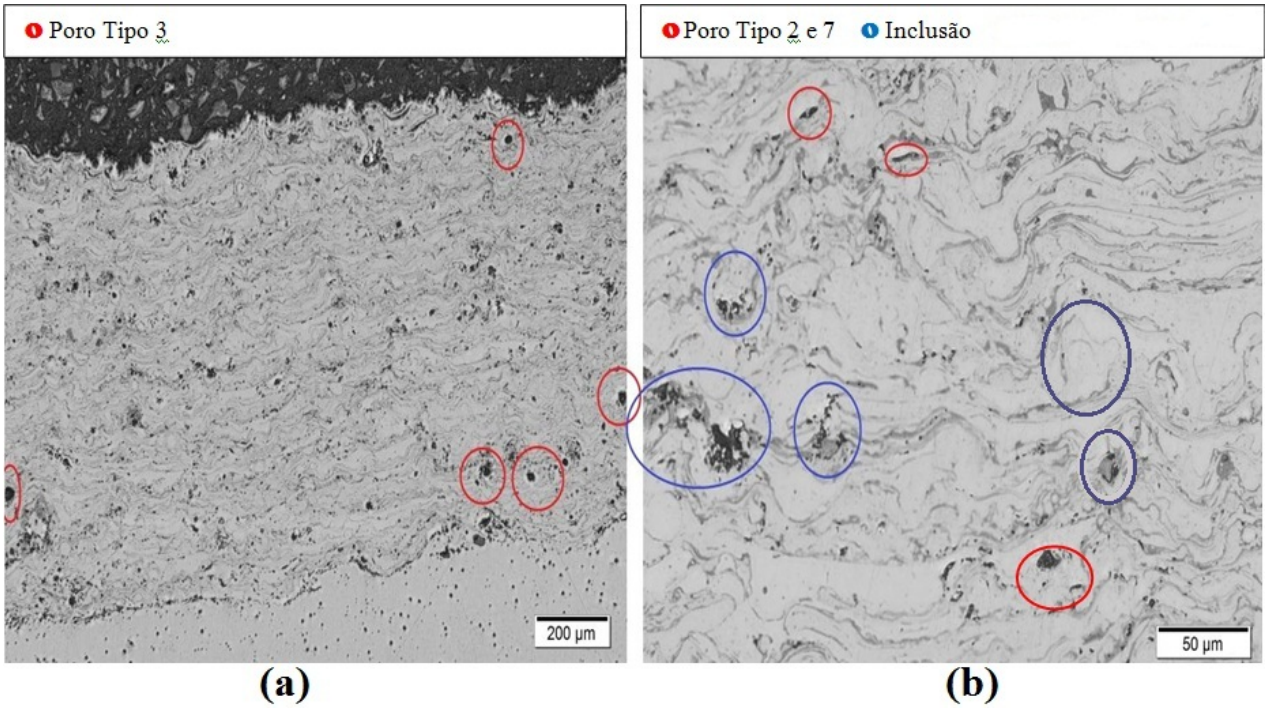


Figura 32 - Amostra 1, Eixo com Selante 2. (a) Aumento de 200x; (b) Aumento de 500x.

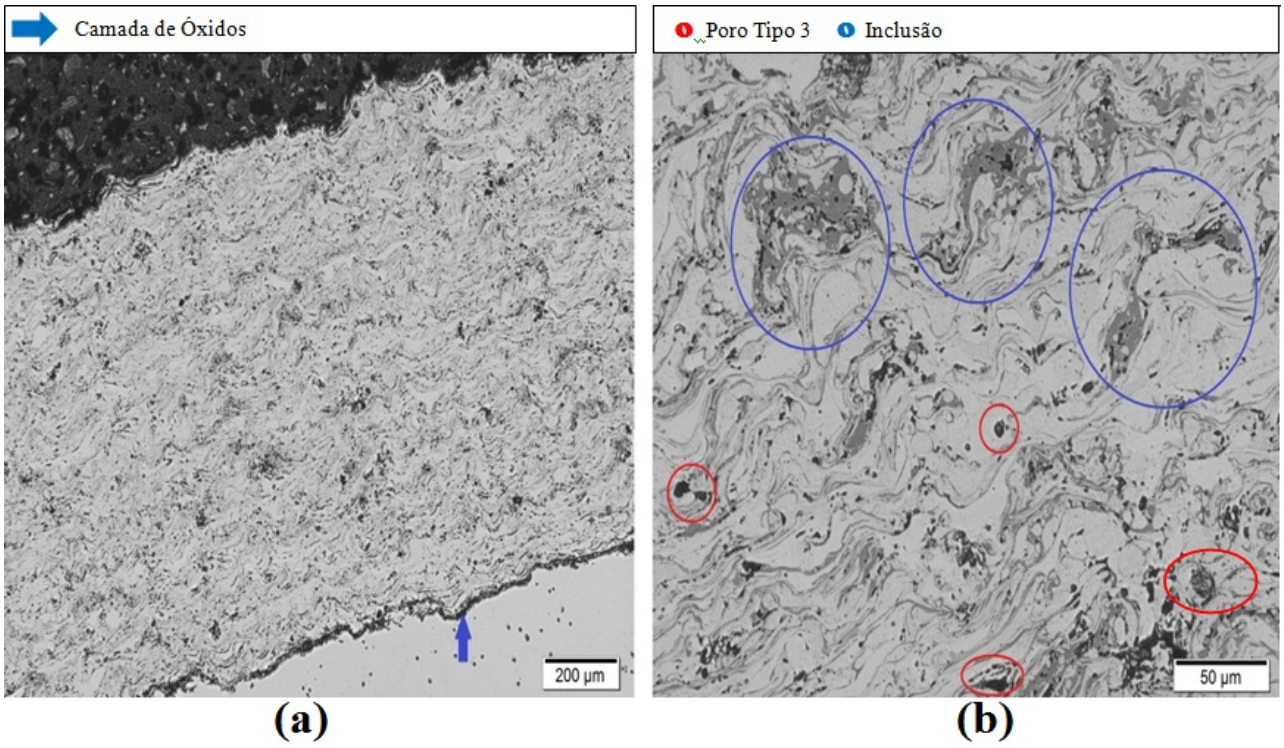


Figura 33 - Amostra 2, Eixo com Selante 1. (a) Aumento de 200x; (b) Aumento de 500x.

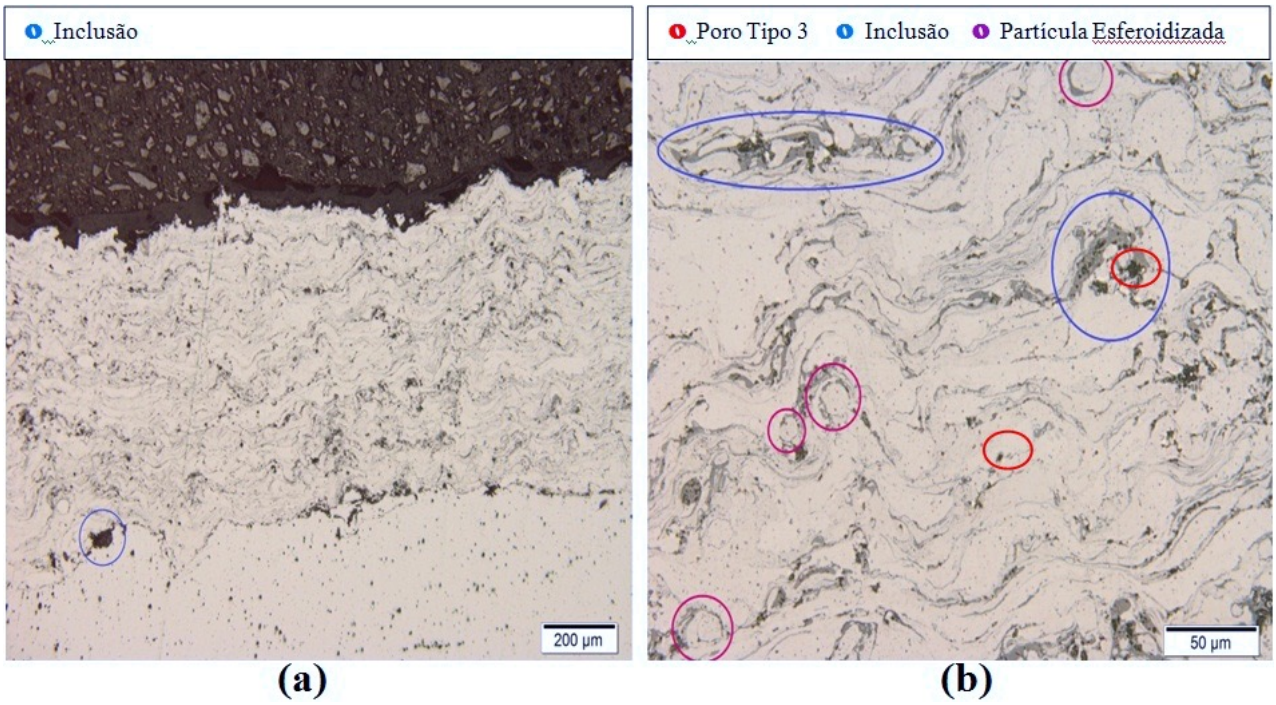


Figura 34 - Amostra 3, Placa com Selante 1. (a) Aumento de 200x; (b) Aumento de 500x.

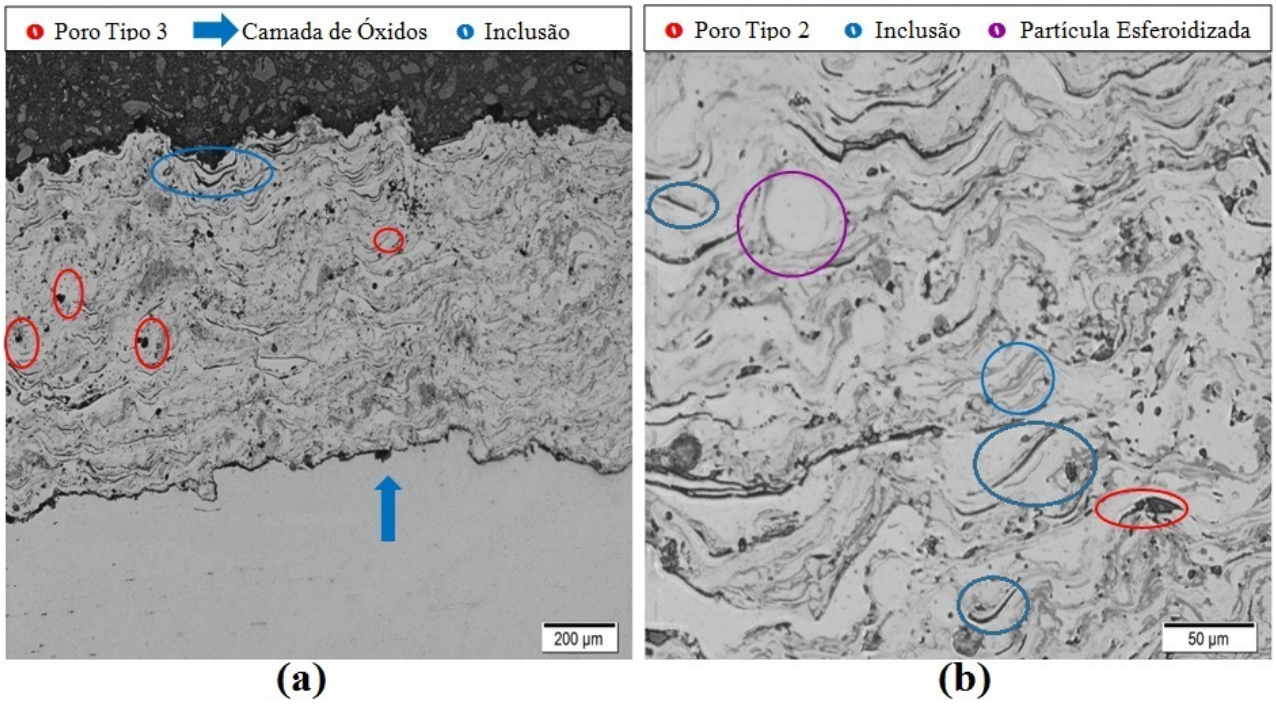


Figura 35 - Amostra 4. Placa com Selante 2. (a) Aumento de 200x; (b) Aumento de 500x.

3.1.1 Inclusões

A comparação de imagens realizadas permitiu obter os seguintes resultados em relação ao aspecto das inclusões encontradas:

- Amostra 1, Eixo com Selante 2: apresenta pontos pretos e camadas alongadas claras
- Amostra 2, Eixo com Selante 1: apresenta a mesma configuração da Amostra 1, porém com a formação de uma camada de óxido entre o revestimento e o substrato. Fato extremamente prejudicial, pois, o revestimento fica sujeito a se desprender do substrato mais facilmente devido à presença dessa camada de óxido.
- Amostra 3, Placa com Selante 1: apresenta pontos pretos e camadas alongadas escuras.
- Amostra 4, Placa com Selante 2: apresenta a mesma configuração da Amostra 3, porém também apresenta a formação de óxidos entre o revestimento e o substrato.

A presença de uma camada de óxido entre o revestimento e o substrato, como pode ser observado nos resultados das microscopias da Amostra 2, Eixo com Selante 1 e da Amostra 4, Placa com Selante 2, pode ter sido ocasionado devido ao fato do preparo da superfície não tenha sido realizado de maneira adequada com o jateamento abrasivo. LIMA et al. [28] demostram a eficácia na remoção dessas camadas através do processo de tratamento térmico de fundição ou de difusão, após o Processo Aspersão Térmica. O método mais usual de tratamento é através do uso de uma tocha de acetileno. A fundição pode ser realizada em uma fornalha, ou com laser, ou com calor de indução, e com uma temperatura entre 1000 a 1200^{o}C para obter efeito sobre o revestimento. Outra solução adequada é a aplicação de camadas metálicas intermediárias antes da realização do processo AT, para melhorar a adesão, que fica reduzida com a formação desse tipo indesejado de camada de óxido.

As inclusões não metálicas de aspecto de pontos pretos estão presentes em todas as amostras, indicando a presença de inclusões do Tipo D (óxidos). As camadas de aspecto alongado claro, evidenciadas nas Amostras 1, Eixo com Selante 2 e Amostra 2, Eixo com Selante 1, também necessitam que os elementos químicos S, Al e Si estejam presentes em quantidade significativas para serem consideradas como inclusões do Tipo A, B e C.

As inclusões metálicas de aspecto alongado escuro, estão mais presentes nas placas, identificadas pelas Amostra 3, Placa com Selante 1 e Amostra 4, Placa com Selante 2, do que nos eixos. É possível que essas diferenças na formação de inclusões surjam devido ao fato dos eixos ficarem submetidos a uma atmosfera em que o oxigênio esteja mais tempo presente, durante a execução do processo. Acredita-se que durante a aplicação do fluxo do spray nos eixos, esse

atinja um lado da sua superfície enquanto o outro lado é exposto à atmosfera, mesmo mantendo-o girando para obter uma aplicação uniforme das camadas. Enquanto que a aplicação do fluxo do spray sob a placa consegue ser mantida para atingir toda a sua superfície.

Em relação ao formato das amostras, as placas possuem uma melhor formação de inclusões metálicas desejáveis em relação ao eixo cilíndrico, podendo considerar que o formato do corpo de prova exerce uma certa influência na otimização das propriedades mecânicas. Em contrapartida, os eixos apresentam uma espessura visualmente maior mesmo após a sua retificação, tornando esse método de aplicação de revestimento o mais adequado para essa finalidade.

Os Estudos sobre a formação de inclusões [29, 30], relatam que as inclusões metálicas com aspecto de estrias escuras formadas em torno da estrutura lamelar estão presentes devido a presença de Cr, sendo o tipo ideal de inclusão a ser formado quando deseja-se melhorar a resistência a corrosão, outros elementos desejáveis também podem estar presentes como o Ni, Si e Mn. Por outro lado, as inclusões metálicas com os elementos S, P, O e H devem ser evitadas pois elas afetam as propriedades mecânicas e fragilizam o revestimento. Isto pode ser feito pela introdução de elementos desoxidantes como o Mn, Si e Al.

Os mesmos Estudos [29, 30] relatam que a adição dos elementos desoxidantes também podem formar inclusões não metálicas com aspecto de camadas alongadas claras e de comprimento de até 100 microns, sendo constituídas de silicatos (SiO_2) ou de óxidos (CO, CO_2) com camadas de sulfetos (MnS). Caso tais inclusões sejam capazes de se formarem na região de partículas esferoidizadas, elas passarão a possuir um aspecto de ponto preto, composta em sua maioria por óxidos.

Berndt et al. [31] observaram que revestimentos formados pelo Processo de Aspersão por Arco Elétrico possuem lamelas mais espessas, de vários tamanhos e com maior quantidade de óxidos do que os revestimentos formados por outros tipos de Processos de Aspersão, apresentando também em sua microestrutura, partículas ressolidificadas antes do impacto, estando de acordo com as micrografias obtidas neste trabalho.

Os Estudos [32, 33] relatam que a microestrutura também pode ser melhorada pelo uso de menores taxas de alimentação, arames de menores diâmetros, gases atomização inertes, redução da distância de aspersão e pela redução da voltagem do arco.

3.1.2. Aspecto dos Poros

A comparação de imagens permitiu obter os seguintes resultados em relação ao aspecto dos poros encontrados:

- Amostra 1, Eixo com Selante 2: apresenta Poros do Tipo 2, 3 e 7
- Amostra 2, Eixo com Selante 1: apresenta Poros do Tipo 3
- Amostra 3, Placa com Selante 1: apresenta Poros do Tipo 3
- Amostra 4, Placa com Selante 2: apresenta Poros do Tipo 2 e 3

Os resultados identificam a presença de poros do tipo 2, 3, e 7, sendo que as do Tipo 3 são as mais frequentes, possivelmente devido às pequenas variações que ocorrem durante o processo, como a pressão do jato de ar. Apesar dos poros do Tipo 7 estarem presentes somente nos eixos, não é possível verificar como a influência do formato das amostras teriam sobre a formação desse tipo de poro, pois a análise feita em microscopia óptica é limitada, devido à pouca quantidade de regiões avaliadas e à sua resolução. Nesse último caso, uma melhor resolução das micrografias também permitiria identificar melhor os aspectos de profundidade, obtendo uma classificando dos tipos de poros visualmente mais precisa e diferenciando-os dos óxidos.

FREITAS [14] demostra que poros do Tipo 3, com formato arredondado e menos grosseiro, são mais frequentes quando, no impacto, as partículas aspergidas não estão completamente fundidas, e assim não preenchem adequadamente os interstícios entre as partículas previamente depositadas. Normalmente isto ocorre, com o aprisionamento de bolhas de ar durante o processo. No caso dos poros do Tipo 7, seu aspecto fino é responsável pela formação de microtrincas.

Estudos [3] relatam que pequenas mudanças nos parâmetros durante o Processo de Aspersão por Arco Elétrico podem diminuir a porosidade, como o de manter o controle do ângulo de aplicação. A porosidade apresenta menor valor quando esse ângulo se aproxima de 90° e tem como um limite inferior o ângulo de 45°. Abaixo deste posicionamento também há um comprometimento de outras propriedades do revestimento como maior formação de microtrincas.

Outra técnica apresentada Berndt et al. [31] é o *ShotPeening* (jateamento da superfície com granalhas esféricas) que é utilizado para a redução do percentual de porosidade antes do processo. Esta técnica foi utilizada em tubulações com superfície termicamente aspergidas, gerando uma redução da faixa de porosidade de 4.33 a 13.63% após o processo de aspersão, à faixa de 0.16 a 0.83%. Além disso, permitiu também um aumento na microdureza do material.

3.1.3. Avaliação dos selantes utilizados

Os resultados obtidos através dos dois tipos de selantes estudados estão representados nas Figura 36 e 37, onde é possível analisar a penetração dos dois tipos de selantes, a fim de realizar uma comparação entre eles.

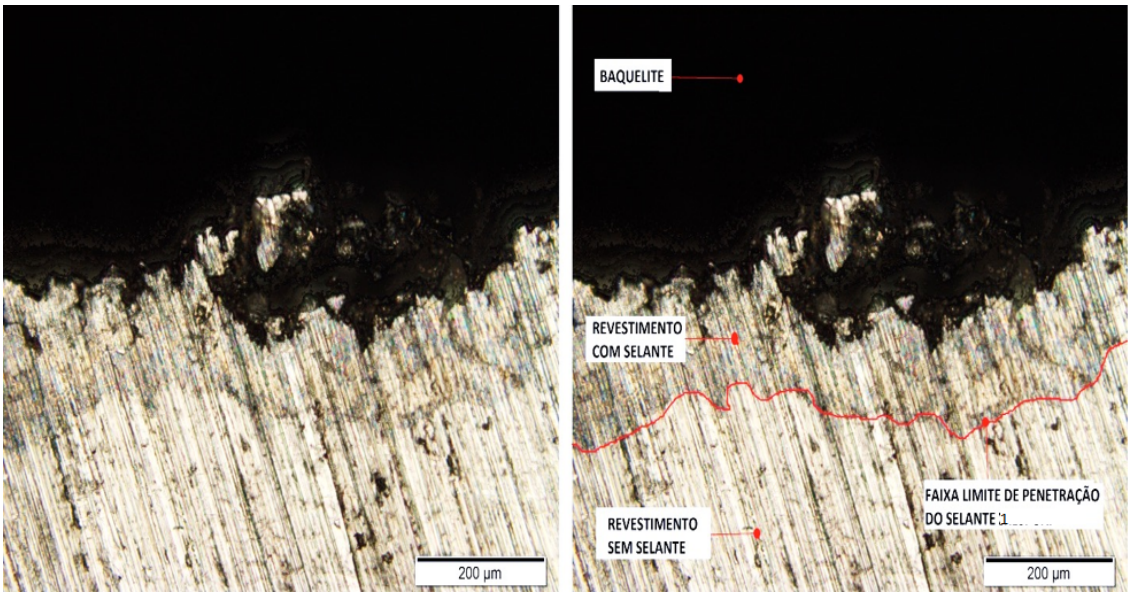


Figura 36 - Amostra 5, Placa com Selante 1, sem polimento com Aumento de 200x.

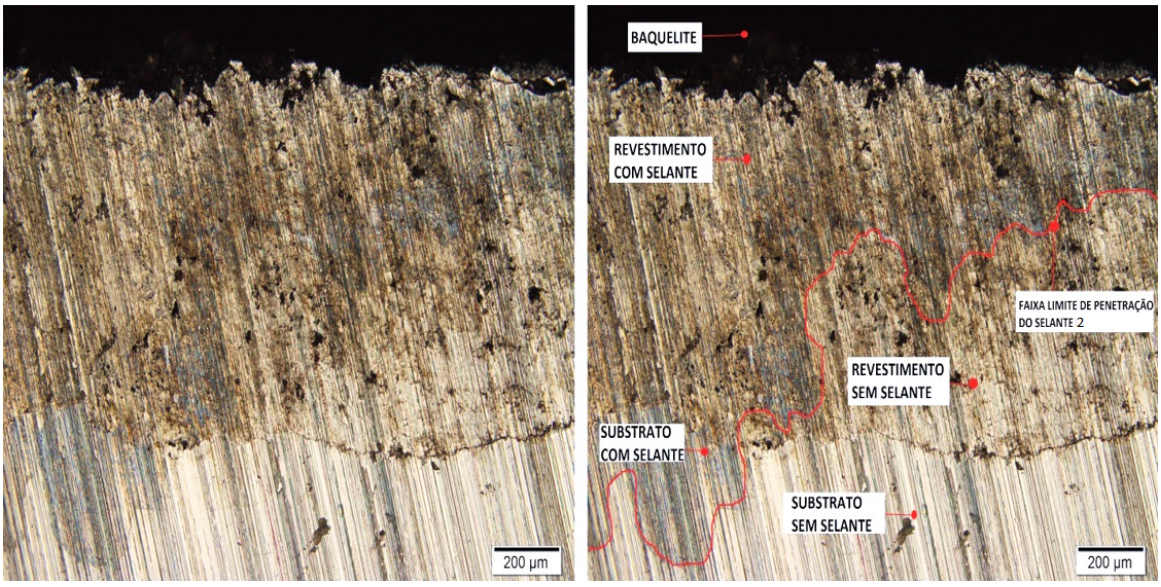


Figura 37 - Amostra 6, Placa com Selante 2, sem polimento com Aumento de 100x.

A Amostra 5, Placa com Selante 1, e Amostra 6, Placa com Selante 2, foram analisadas sem o polimento com o propósito de manter a presença dos selantes e de visualizar a penetração

destes pela sua coloração levemente azulada. Dessa forma, o selante Selante 2 apresentou uma penetração maior do que o Selante 1 , chegando a atingir o material do substrato, como pode ser observado na Figura 38. Essa diferença de penetração pode ter surgido devido às diferenças entre as propriedades de capilaridade entre estes dois selantes e na maneira de aplicação dos mesmos.

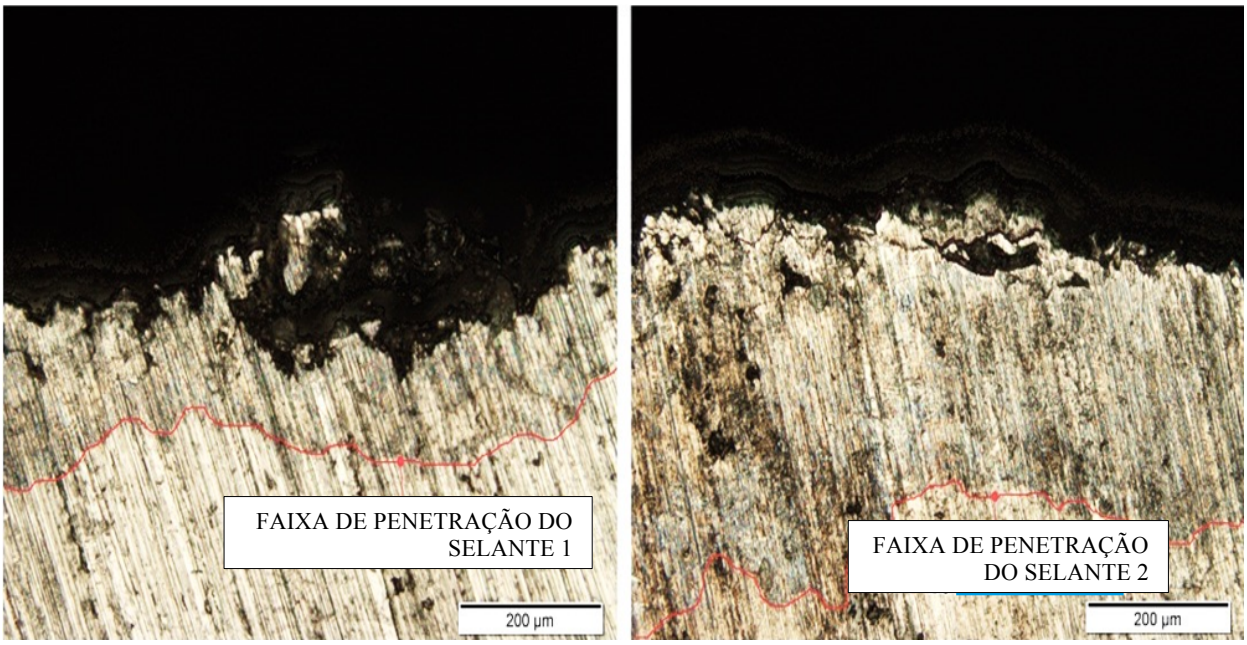


Figura 38 - Penetração dos Selantes com Aumento de 200x. (a) Amostra 5, Placa com Selante 1; (b) Amostra 6, Placa com Selante 2.

O Selante 1 é um selante com base de resina epóxi. Estudos sobre a utilização desse tipo de selante sobre o revestimento formado por Aspersão Térmica [17], comprovam que ele deve ser aplicado no seu estado líquido, seguido normalmente de um aquecimento para melhorar sua penetração. Quando aplicado em forma de spray ou tinta, o procedimento deve ser repetido várias vezes para melhorar a penetração. Nota-se que a penetração foi satisfatória caso não seja necessário usinagem da peça.

LISCANO et al. [34] analisaram a influência que os selantes com diferentes propriedades químicas exercem sobre a microestrutura, além da sua capacidade de penetração no substrato. É relatado que os selantes a base de ácido fosfórico são capazes de alterar consideravelmente a microestrutura, diferentemente dos selantes a base de fenol e epóxi. Esses últimos possuem excelente penetração nos espaços vazios, contribuindo para reduzir consideravelmente a porosidade.

O Selante 2 é um selante com base de copolímero e com aditivos. As informações técnicas [35, 36] desse selante fornecem informações mostrando que sua eficácia em vedar

macroporosidades internas, ele deve ser aplicado na forma mais líquida para uma impregnação segura. As mesmas informações relatam o desenvolvimento de selantes com as mesmas propriedades do Selante 2, capazes de fornecer capilaridades similares, além de características não-adesivas (semelhantes aos os selantes de politetrafluoretileno, PTFE) e características como a capacidade de melhorar as suas propriedades e de reduzir a sua densidade (semelhantes aos selantes que possuem aditivos de carbonato de cálcio, PCC) ou aditivos de nanocarbonato de cálcio (NPCC). Este selante é de alta capilaridade e não foi usado diluente, pois suas características são de baixíssima viscosidade.

Esta característica de maior penetração e capilaridade é importante, pois normalmente é necessário usinar as placas e eixos que foram aspergidos. Esta maior penetração vai garantir que o revestimento após a execução de uma retifica ainda possua selante e este ainda atue na melhoria da qualidade do revestimento. Apesar de mais caros, selante com base de copolímero e com aditivos demostram, com os resultados obtidos nesta dissertação, serem uma boa alternativa em relação aos tradicionais selantes epóxis usados no Brasil.

Além da proteção contra a corrosão, podemos citar outras vantagens da aplicação do selante após deposição por aspersão térmica, como: a redução do contato dos poros com sujeira e outros contaminantes do meio, a redução da rugosidade superficial do material, o efeito de alisamento da superfície que mantém o material mais limpo e a obtenção de diferentes colorações por meio de pigmentos inseridos no selante que muitas vezes dispensa pinturas adicionais [26]. A rugosidade da superfície influencia diretamente na proteção contra a corrosão, já que uma menor rugosidade provoca uma menor área exposta ao meio corrosivo, tornando o material menos suscetível à corrosão [27]. Dentre as principais propriedades necessárias para um bom desempenho do selante, podemos citar a baixa viscosidade (menor ou igual a 3 Poise) para permitir uma boa penetração e a alta resistência à umidade [5,26]. A penetração do selante em revestimentos aspergidos depende principalmente da quantidade de selante absorvida pelo revestimento e da porosidade da superfície aspergida [25].

3.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A seguir são detalhados os resultados obtidos na análise feita por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) através de análises pontuais e de linha, via análise EDS "Energy Dispersive Spectroscopy" realizados na Amostra 7, Placa sem Selante.

3.2.1. Análise de Linha obtida por EDS

A avaliação por EDS permite determinar a energia dos fótons (keV) e o número de fótons recebidos (contagens) contidos na linha amarela traçada no item a da Figura 39 para traçar o espectro do item b. No revestimento, estão presentes os elementos Fe, Ni, Cr, Si, Mn e S, que estavam contidos no material do arame. Esses elementos apresentam variações de intensidade conforme encontram-se distribuídos no revestimento, indicando a formação de uma microestrutura heterogênea. É possível observar também a presença de elementos no revestimento, como Cr e Ni, que não estavam presentes no material do substrato e um aumento na intensidade do Mn.

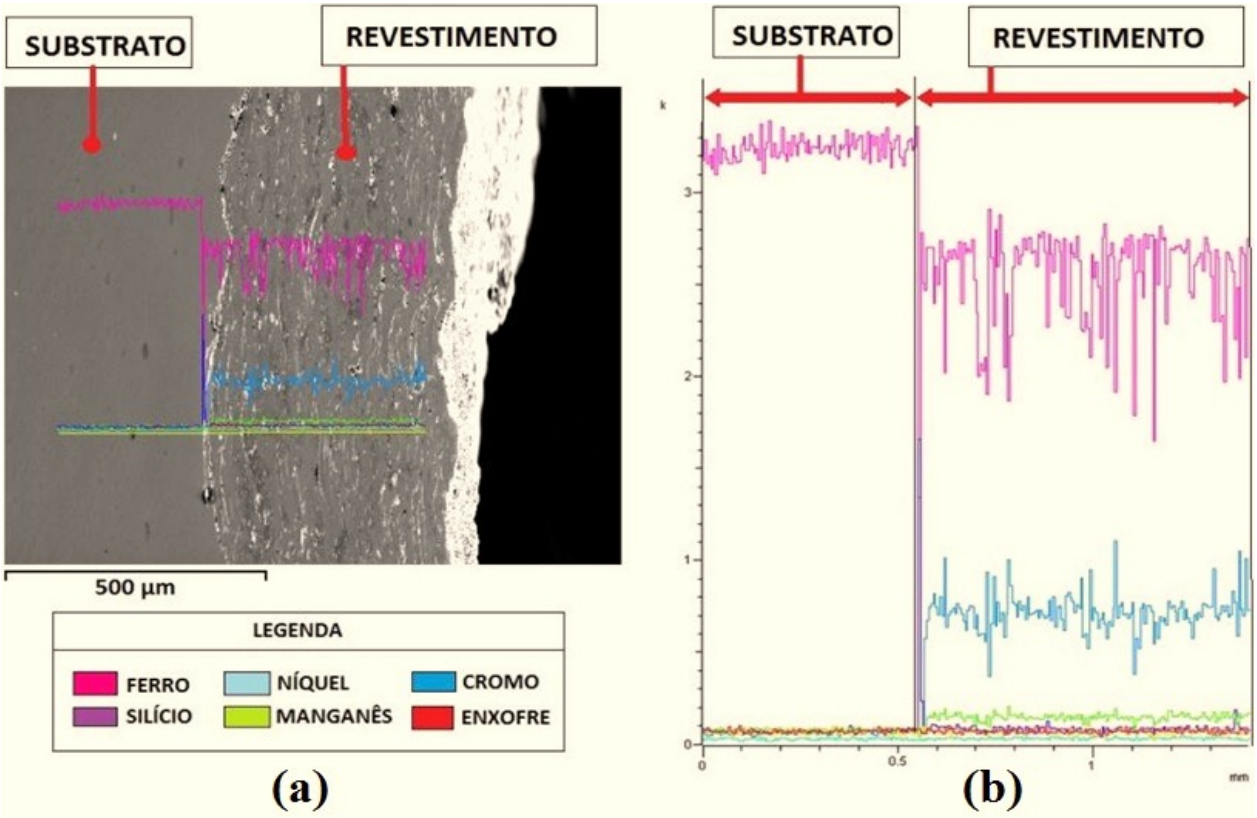


Figura 39 - Amostra 7, Placa sem Selante. (a) Espectro de EDS em Linha; (b) Histograma.

3.2.2. Análise de Ponto obtida por EDS

Na Figura 40 é possível identificar como os elementos existentes na área observada pelo Spectrum 2 encontram-se distribuídos conforme a posição em que ocupam. Os elementos e as respectivas posições podem ser observados no item b através da representação de um diagrama circular indicando qual elemento químico está presente. Os elementos químicos que possuem contabilizaram uma quantidade inferior a 0,2% de massa, não podem ser detectados por essa técnica [36].

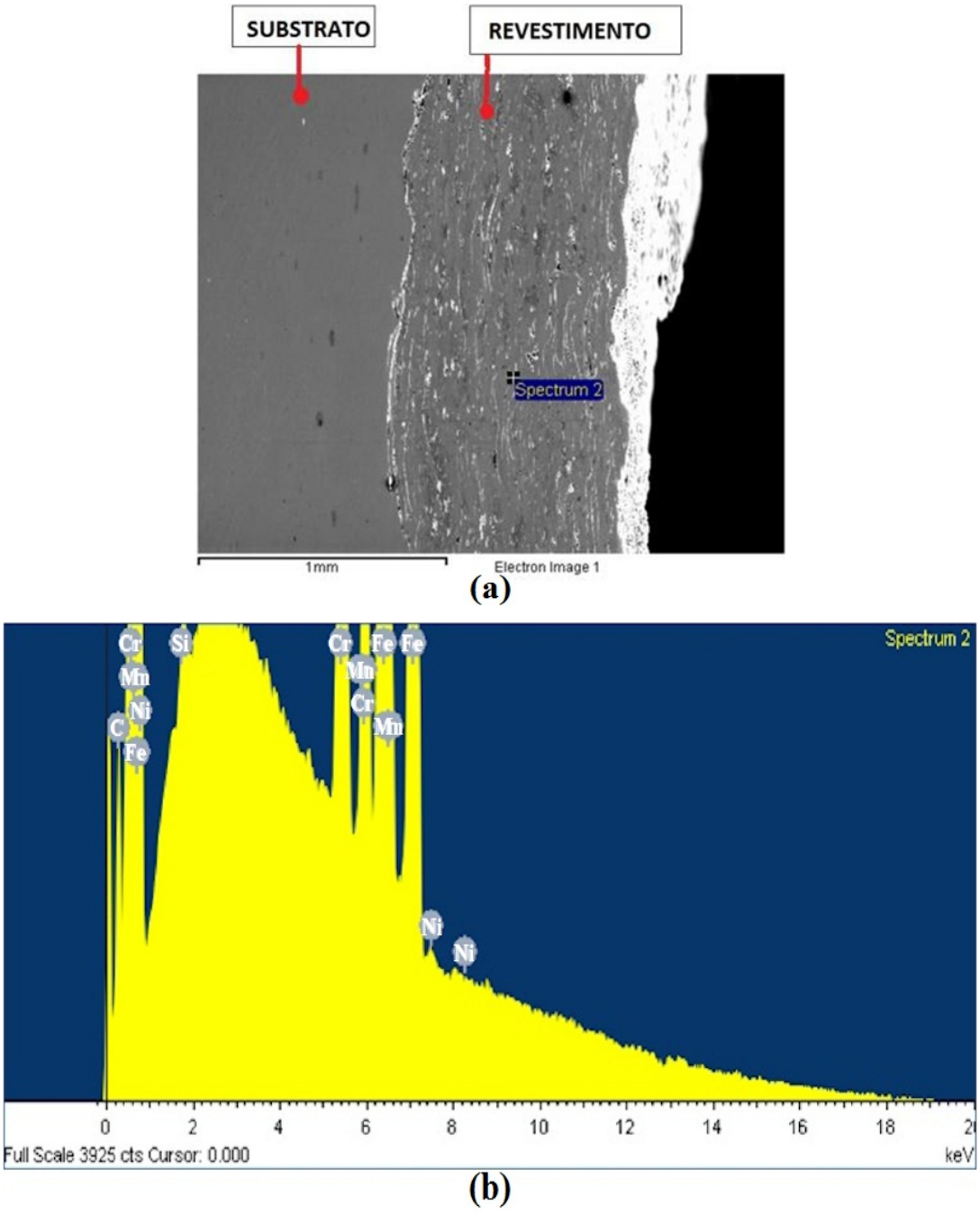


Figura 40 - Amostra 7, Placa sem Selante. (a) Posição da análise de Ponto por EDS; (b) Espectro obtido com a indicação dos elementos obtidos.

3.2.3. Análise dos Elementos Químicos

A identificação dos elementos químicos por linha e por ponto, é feita através da análise da superfície dos picos, que é proporcional a quantidades de átomos produzidos. Porém, as dificuldades são inúmeras devido à fatores que fazem variar a superfície dos picos, como tensão de aceleração, natureza dos outros elementos presentes, repartição dos elementos no volume analisado e geometria das superfícies analisadas [36].

Dessa forma, a análise de EDS permite obter o peso, a atomicidade e a razão de energia envolvida (keV), a ser observada pela Tabela 11, mas não possibilita a obtenção de composição química do revestimento por ser uma técnica qualitativa. Contudo, a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) possibilita obter microscopias para analisar a microestrutura formada, porém com mais detalhes do que as fornecidas pela Microscopia Óptica.

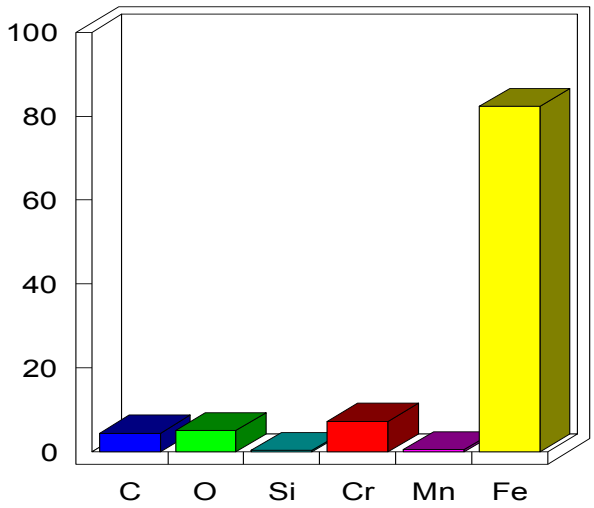
Tabela 11 - Elementos presentes no revestimento obtidos por EDS.

ELEMENTO	PESO %	ÁTOMO %	keV
Si	0,30	0,46	0,1
Cr	7,23	5,98	1,2 a 1,4
Mn	0,53	0,42	0,2 a 0,1
Fe	82,36	63,41	2,9 a 1,7
Ni	< 0,2	-	0,055 a 0,02
S	< 0,2	-	0,05

Através do resultado obtido pelo Gráfico 1 é possível observar que a Amostra 7, placa sem Selante, possuí:

- Uma presença significativa do Fe, provavelmente estando mais presente no material do substrato do que no revestimento.
- Uma presença significativa do Cr no revestimento em comparação com os demais elementos, exceto para o Fe.
- Outros elementos apresentados em ordem decrescente como Mn, Si, S e Ni, também estão presentes no revestimento, mas com peso, átomo e energia bastante inferiores em relação ao Cr.

Gráfico 1 - Elementos presentes no revestimento.



Em relação as inclusões metálicas, o fato do Cr ser o elemento com intensidade maior de peso, átomo e energia, indica que possivelmente as inclusões metálicas observadas nas micrografias com aspecto de camadas alongadas escuras são constituídas de Cr, porém uma análise da composição química se torna necessária para validar essa hipótese. Essas inclusões também podem ser formadas devido ao Mn, que neste caso precisa, precisa estar presente em pequenas quantidades.

A literatura [27, 38] demostra que a presença de Cr, Ni e Mn na composição do arame possuem a finalidade específica de otimizar as propriedades mecânicas de um substrato. Porém para que isto ocorra, esses elementos devem estar presentes em quantidades significativas para formar inclusões metálicas (Cr com teor máximo de 12%, Ni com teor de 12 a 20% e Mn com teor inferior a 0,5%), conforme visto nas Tabelas II.2 e II.3 [21].

Em relação as inclusões não metálicas, o fato do O ser o elemento com intensidade maior de peso, átomo e energia, indica que possivelmente a maioria das inclusões não metálicas observadas na micrografia, são as de aspecto de pontos pretos são do Tipo D. A ausência do Al indica que as inclusões do Tipo B não são formadas. O Si possuí uma intensidade maior que o S, indicando que possivelmente as inclusões não metálicas observadas na micrografia com aspecto de camadas alongadas claras são do Tipo C e estão mais presentes do que as do Tipo A.

A mesma literatura [27, 38] relata que o Si é um elemento muito utilizado na composição dos arames por ter uma ação desoxidante ao se combinar com o O, passando a possuir um aspecto bastante esférico e impedindo que óxidos se formem na camada de revestimento. Novamente é necessário analisar a composição química para verificar se o Si se encontra em quantidades adequadas para exercer uma ação desoxidante e/ou se irá formar inclusões do Tipo C. O mesmo pode ser dito em relação ao S para a formação de inclusões do Tipo A.

Portanto, para a condição analisada da Amostra 7, Placa sem Selante, é provável que as inclusões não metálicas formadas sejam óxidos e que as inclusões metálicas formadas sejam devidas a presença do Cr e do Mn, estando de acordo com os resultados observados na microscopia óptica que indicam a presença de pontos pretos e camadas alongadas escuras para a condição de placa das Amostras: 3, Placa com Selante 1 e 4, Placa com Selante 2.

3.2.4. Otimização das Propriedades

É possível verificar através da Tabela 12 como a presença dos elementos químicos encontrados na Amostra 7, placa sem selante irão contribuir para a otimização das propriedades mecânicas. Porém, essa otimização irá depender fundamentalmente do teor dos elementos capazes de formar inclusões metálicas e será afetada pela formação de inclusões não metálicas.

Tabela 12 - Influência dos elementos nas propriedades do revestimento [39].

INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES	**ELEMENTOS QUÍMICOS**						
	C	**O**	**Si**	**Cr**	**Mn**	**Ni**	**S**
Aumento da Resistência Mecânica	x		x		x		
Aumento da Dureza	x	x	x	x	x		
Redução da Ductilidade	x						x
Ação Desoxidante			x				
Aumento da Resistência a Corrosão			x	x		x	
Aumento da Resistência ao Desgaste					x		

A literatura [21, 39] relata que a presença do Cr no revestimento pode ser justificada para ser utilizado como refinador de grão, ao ser adicionado juntamente como o titânio. Ele também é usado para diminuir a incidência de trincas resultantes de tensões e de corrosão sob tensão, além de proporcionar aumento de resistência mecânica em temperaturas elevadas quando encontrado com um teor de até 12%. Ele é encontrado nos arames com um teor de 12 a 14%, o que indica que provavelmente a resistência da corrosão é melhorada. Porém, a análise da composição química do revestimento e ensaios de corrosão devem ser efetuados para validar a otimização dessa propriedade.

O Ni e Si também contribuem para melhorar a resistência a corrosão. Porém, sua eficácia é notada em quantidades respectivamente de até 20%, e 2%, para aumentar a resistência a corrosão e a dureza [21]. A quantidade desses elementos encontrada nos arames, de 1% para o

Ni e de 0,08% para o Si, conforme a Tabela 5, foi muito inferior ao percentual exigido, logo provavelmente esses elementos não contribuem para a otimização dessas propriedades no revestimento.

O Mn contribui para aumentar a resistência ao desgaste quando é encontrado em quantidade inferiores a 5%, formando inclusões metálicas [21]. Ele é encontrado nos arames com um teor de 1%, conforme a Tabela 5, o que indica que provavelmente a resistência ao desgaste é melhorada. Porém, a análise química do revestimento e ensaios mecânicos devem ser efetuados para validar a otimização dessa propriedade.

3.2.5. Avaliação da Microestrutura

Nas micrografias das Figuras 41 a 43 é possível verificar com mais detalhes a presença de defeitos (microtrincas, poros e inclusões não-metálicas), e observar as diferenças de profundidade formada entre inclusões e poros que muitas das vezes se faz confundir durante a análise com o Microscópio Óptico.

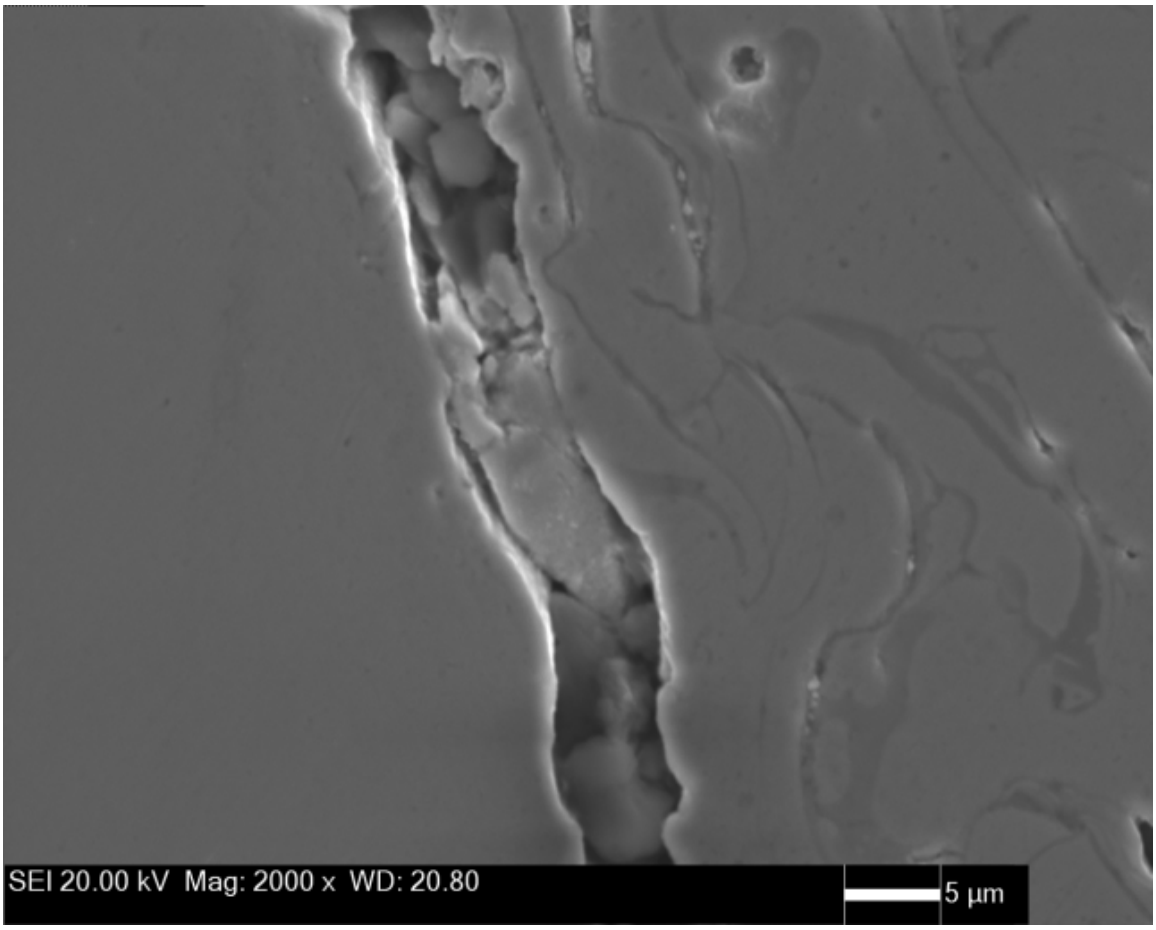


Figura 41 - Inclusões não metálicas e Poros

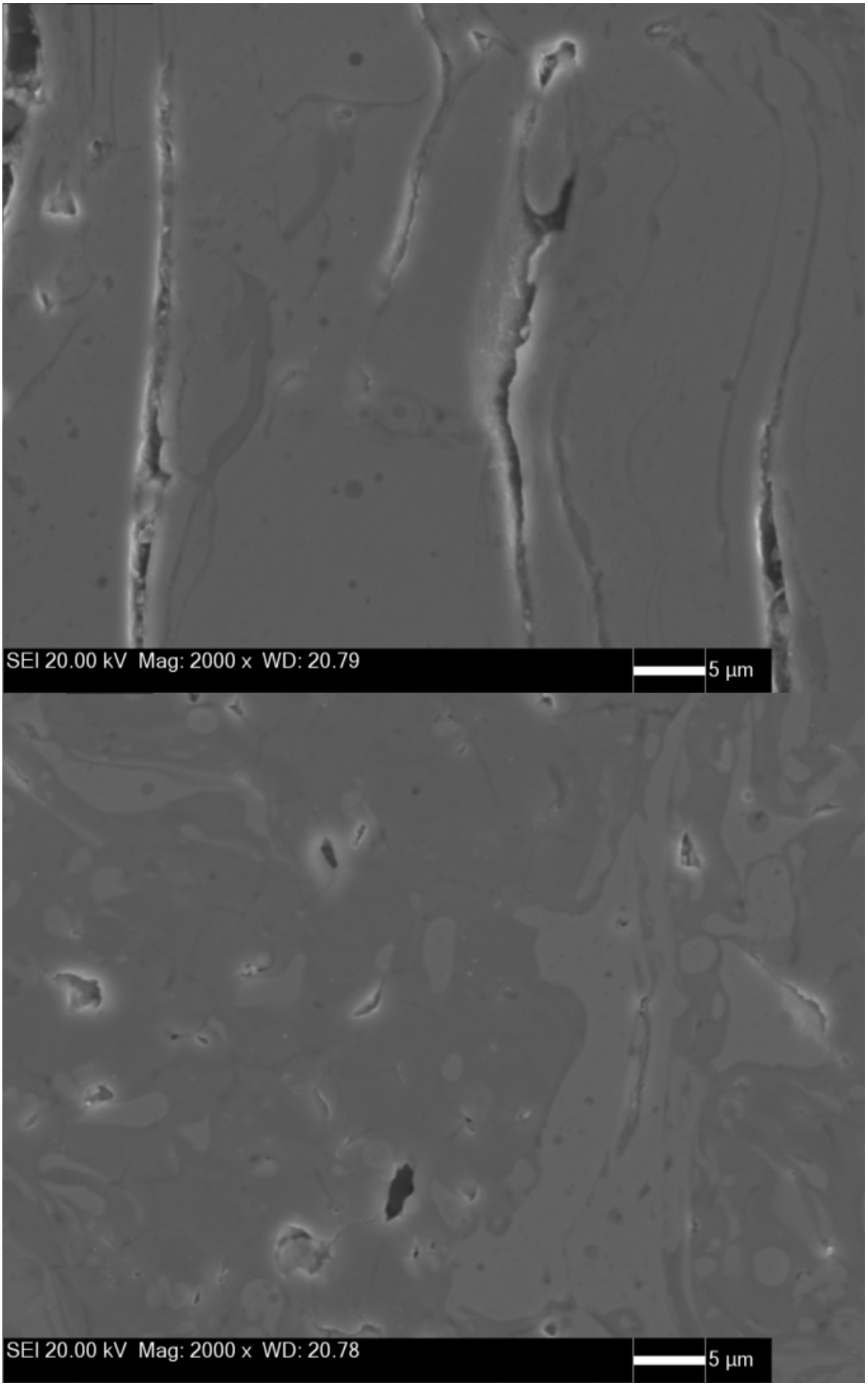


Figura 42 - Microestruturas ideais pelo MEV. (a) Foto Superior: Inclusões metálicas; (b) Foto Inferior: Estrutura lamelar.

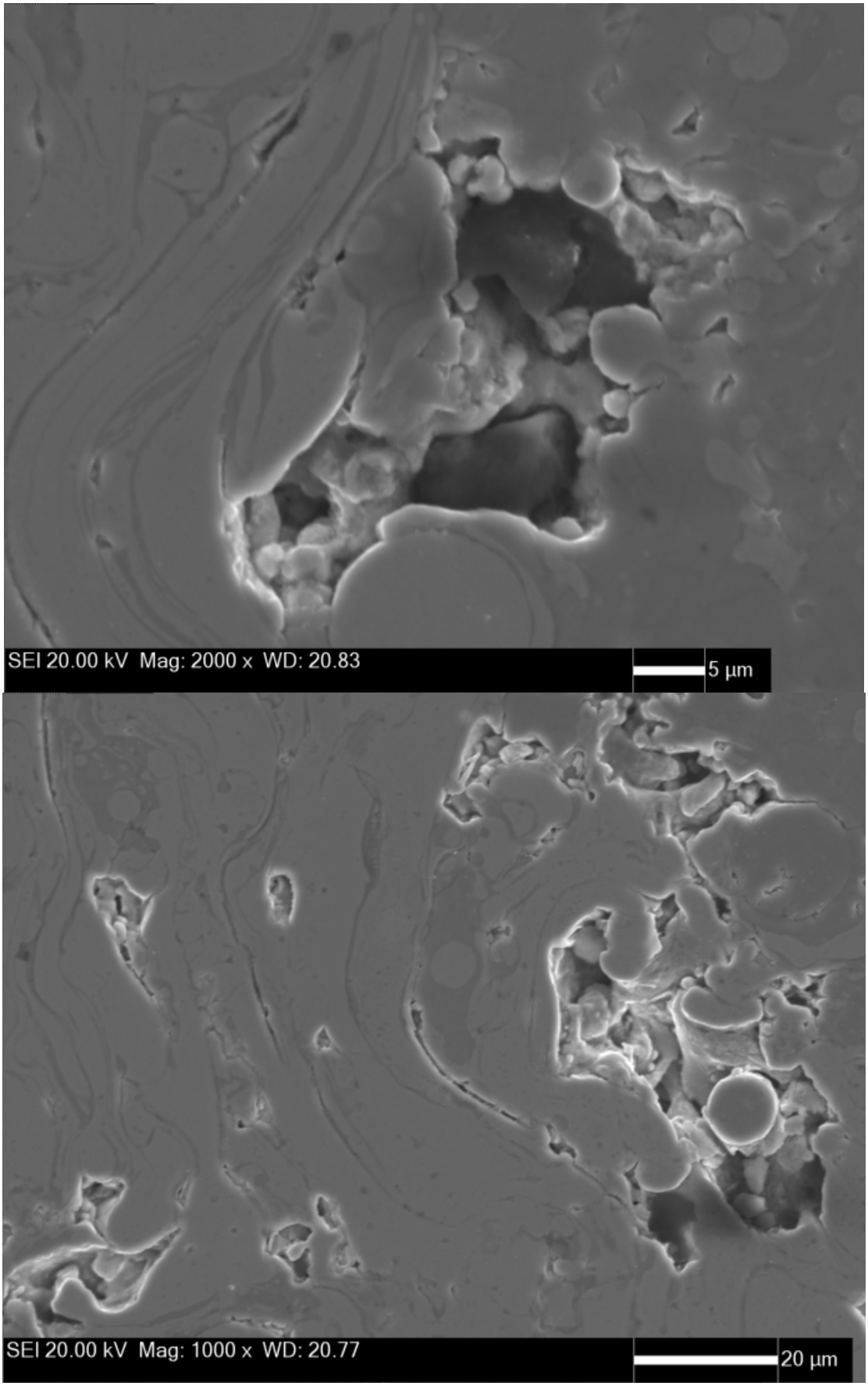


Figura 43 - Microestruturas a serem evitadas. (a) Foto Superior: Óxidos; (b) Foto Inferior: Poros e Rede de Óxidos.

3.3. Ensaio de Dureza

Os Ensaios de Microdureza Vickers foram realizados nas Amostras de 1 a 4 para quantificar a dureza. Considerou-se a primeira camada como a camada mais próxima do substrato e a terceira camada como a camada mais próxima à superfície do revestimento, conforme Figura 44.

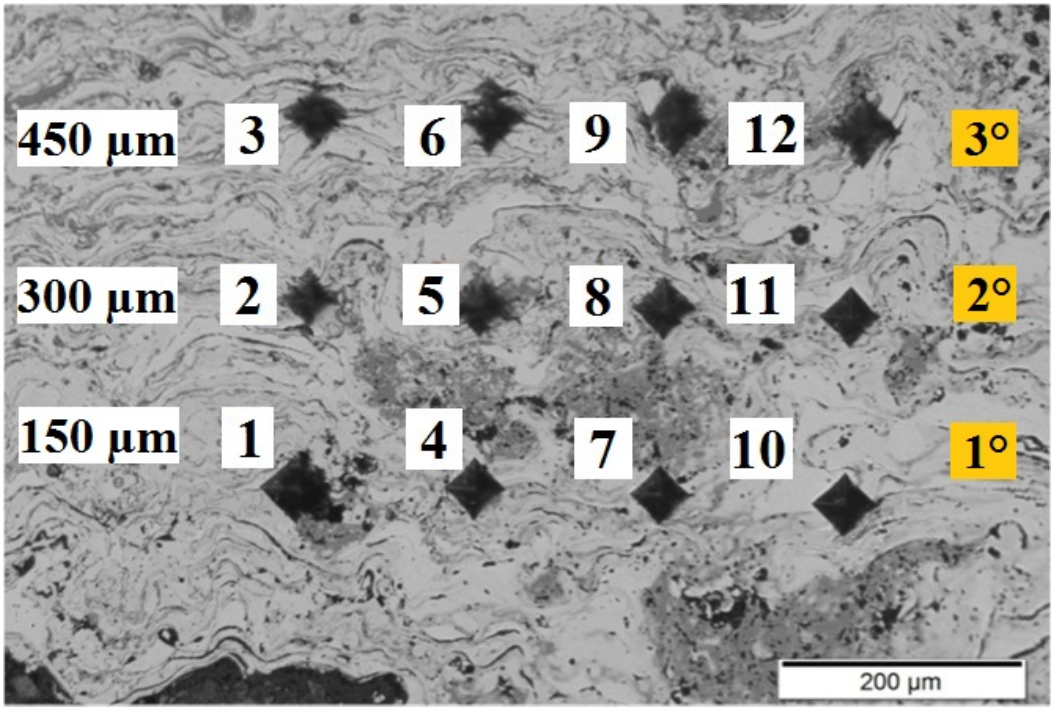


Figura 44 - Distribuição das doze Indentações.

Os resultados serão representados graficamente em relação ao número de camadas, com o eixo das abcissas representados por uma base escolhida em função das indentações no sentido horizontal (1°:1-4-7-10; 2°: 2-5-8-11; 3°: 3-6-9-12). E também serão representados graficamente em relação a sua espessura, com o eixo das abcissas representado por uma base escolhida em função da posição das indentações no sentido vertical (1-3; 4-6; 7-9; 10-12).

Os valores obtidos permitem avaliar o comportamento da intensidade da dureza conforme a variação da espessura e o número da camada de revestimento. Tendo como base, que o comportamento ideal é almejado com o aumento proporcional dos elementos envolvidos, ou seja, aumentar a dureza conforme aumenta-se o número de camadas e a espessura [7].

3.3.1. Medidas de Microdureza para Amostra 1, Eixo com Selante 2

A microdureza média obtida foi de 317 HV, com valor máximo de 415 HV na indentação 10, conforme a Tabela 13.

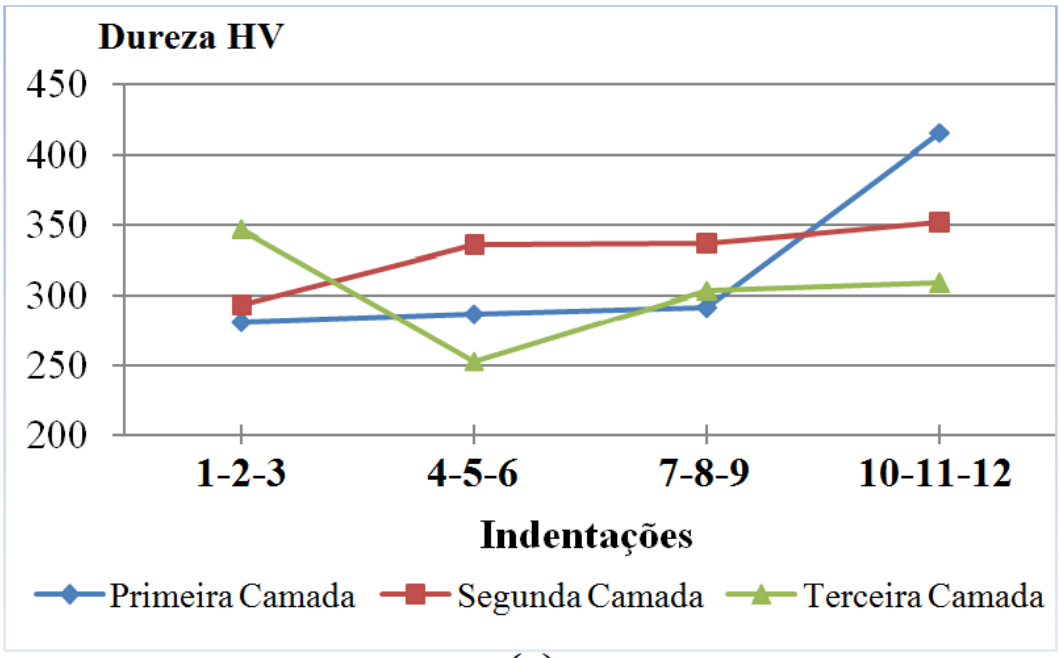
Tabela 13 - Valores da Dureza Vickers (HV), Rockwell C (HRc) e Brinell (HB)

INDENTAÇÃO	D1 (µm)	D2 (µm)	DUREZA		
			HV	HRc	HB
1	56,62	58,38	280	27	264
2	55,76	57,67	292	29	279
3	51,48	51,92	347	35	327
4	56,53	57,40	286	28	271
5	52,19	53,07	335	34	319
6	61,14	60,13	252	23	243
7	54,98	58,04	290	29	279
8	52,26	52,73	336	34	319
9	54,03	56,56	303	30	286
10	47,60	46,90	415	42	390
11	49,77	53,01	351	36	336
12	53,71	56,08	308	31	294

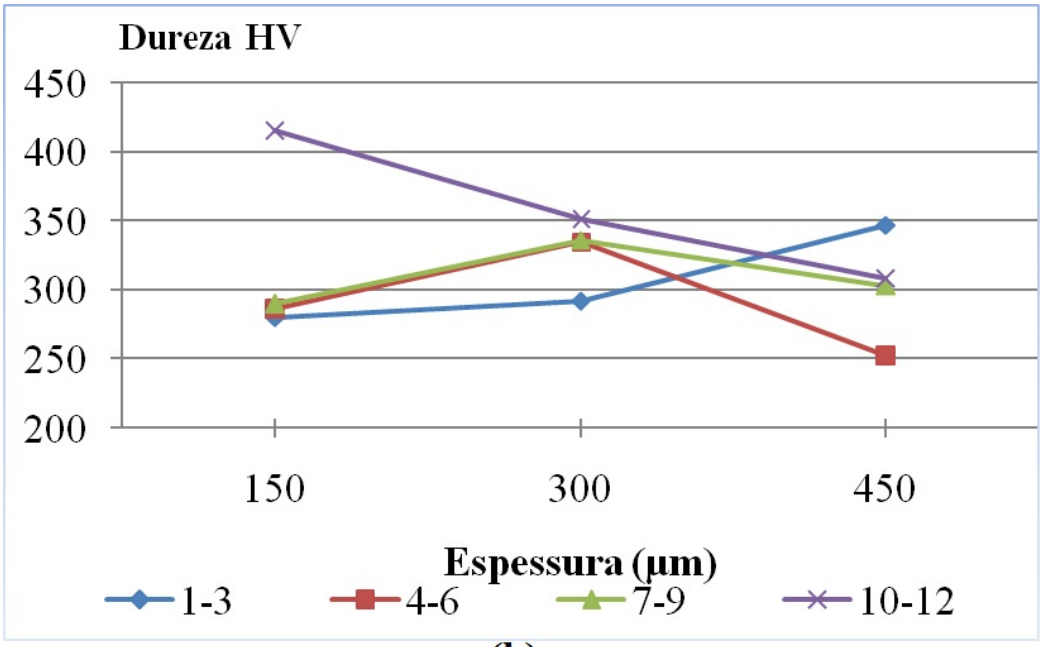
No Gráfico 2, observa-se uma certa tendência a aumentar a dureza mantendo uma proporcionalidade.

Contudo, no item a do Gráfico 2, observa-se que essa amostra apresentou uma discrepância de valor na terceira camada, podendo ser comprovado no item b do mesmo Gráfico 2, com a sua queda ao aumentar da espessura de 300 µm para 450 µm. Isto pode ter sido ocasionado pela microestrutura formada, quando surgem poros e microtrincas.

Gráfico 2 - Amostra 1 (a) Em Relação ao Número de Camadas; (b) Em Relação à Espessura.



(a)



(b)

3.3.2. Medidas de Microdureza para Amostra 2, Eixo com Selante 1

A microdureza média obtida foi de 367 HV, obtendo um valor máximo de 449 HV na indentação 12, conforme a Tabela 14.

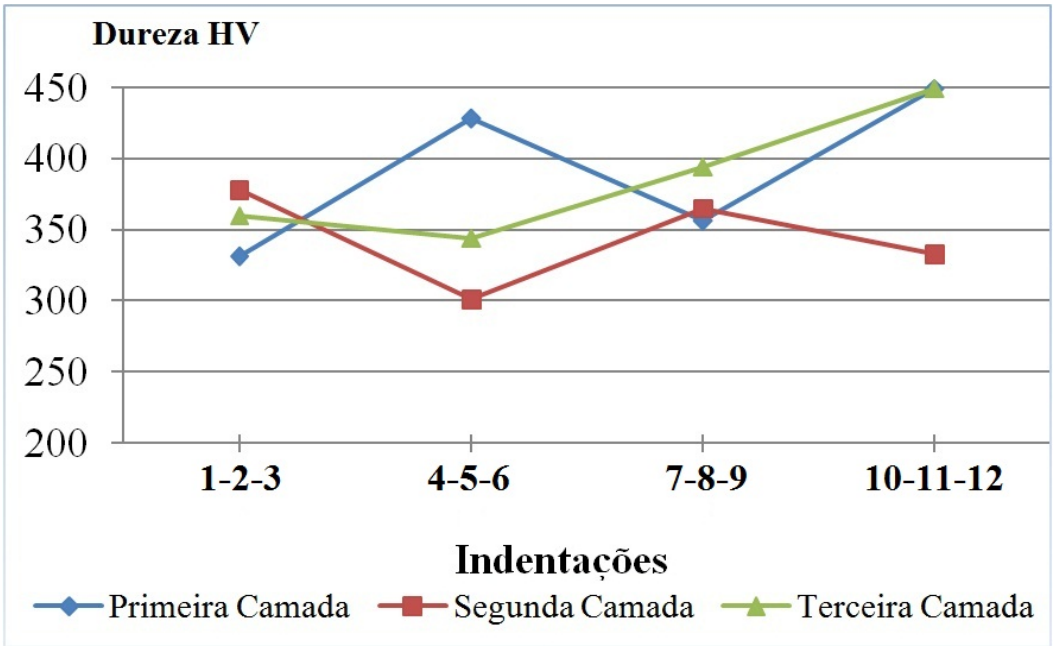
Tabela 14 - Valores da Dureza Vickers (HV), Rockwell C (HRc) e Brinell (HB)

INDENTAÇÃO	D1 (µm)	D2 (µm)	DUREZA		
			HV	HRc	HB
1	53,11	52,69	331	34	319
2	49,08	49,95	378	38	353
3	49,85	51,61	360	37	344
4	47,23	45,85	428	43	400
5	54,86	55,79	301	30	286
6	51,65	52,25	344	35	327
7	52,65	49,43	356	36	336
8	50,88	49,97	365	37	344
9	49,04	48,04	394	40	371
10	49,17	51,88	363	37	344
11	52,16	53,35	333	34	319
12	45,23	45,67	449	45	421

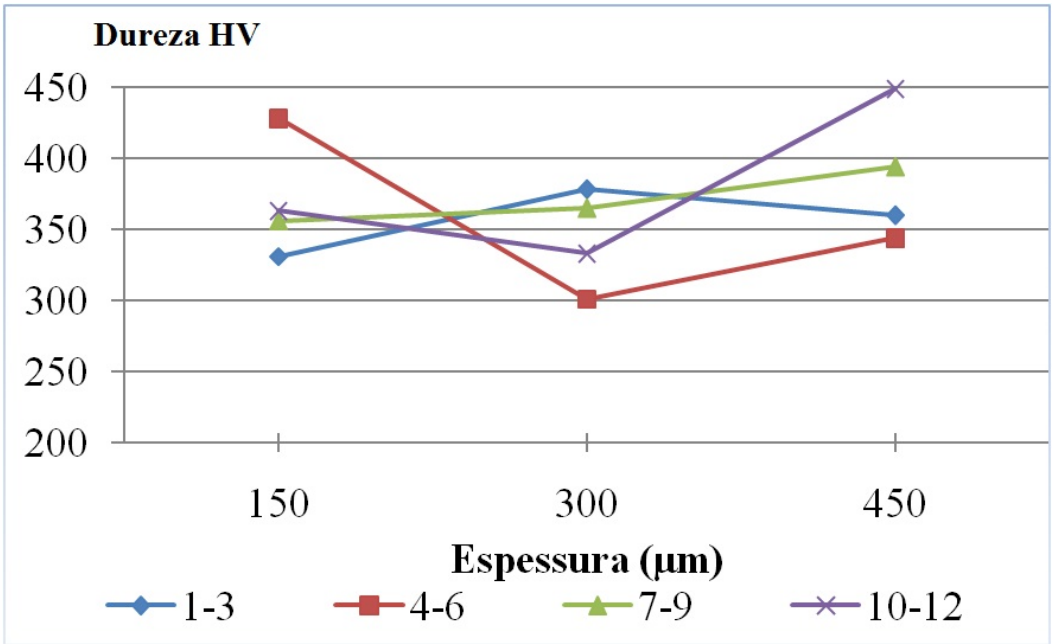
No Gráfico 3, também se observa uma tendência a aumentar a dureza mantendo uma proporcionalidade.

Contudo, observa-se que essa amostra apresentou uma discrepância de valor, com um aumento na primeira camada. Isto pode ter sido ocasionado devido a microestrutura formada, por exemplo, quando uma camada de óxido (inclusão não-metálica) surge entre o revestimento e o substrato.

Gráfico 3 - Amostra 2 (a) Em Relação ao Número de Camadas; (b) Em Relação à Espessura.



(a)



(b)

3.3.3. Medidas de Microdureza para Amostra 3, Placa com Selante 1

A microdureza média obtida nesta amostra foi de 312 HV, obtendo um valor máximo de 393 HV na indentação 9, conforme a Tabela 15.

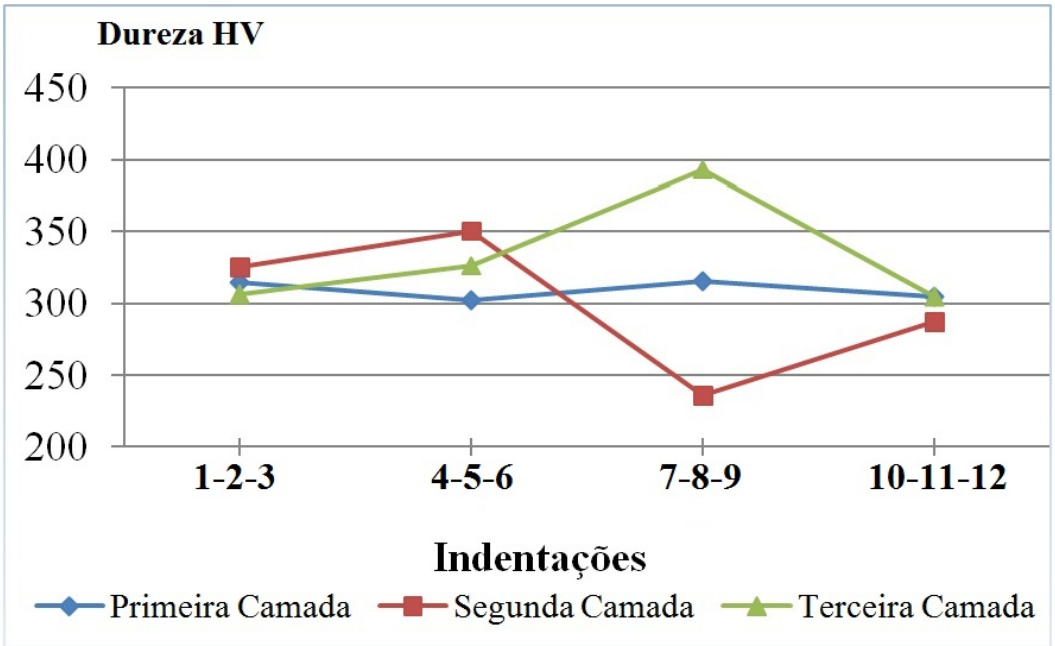
Tabela 15 - Valores da Dureza Vickers (HV), Rockwell C (HRc) e Brinell (HB)

INDENTAÇÃO	D1 (µm)	D2 (µm)	DUREZA		
			HV	HRc	HB
1	55,81	52,81	314	31	294
2	51,72	55,12	325	33	311
3	52,65	57,52	306	30	286
4	54,10	56,68	302	30	286
5	51,30	51,68	350	36	336
6	56,32	50,38	326	33	311
7	52,98	55,52	315	32	301
8	60,92	64,43	236	20	226
9	47,42	49,67	393	40	371
10	56,21	58,97	280	27	264
11	55,57	58,52	287	28	271
12	56,33	54,15	304	30	286

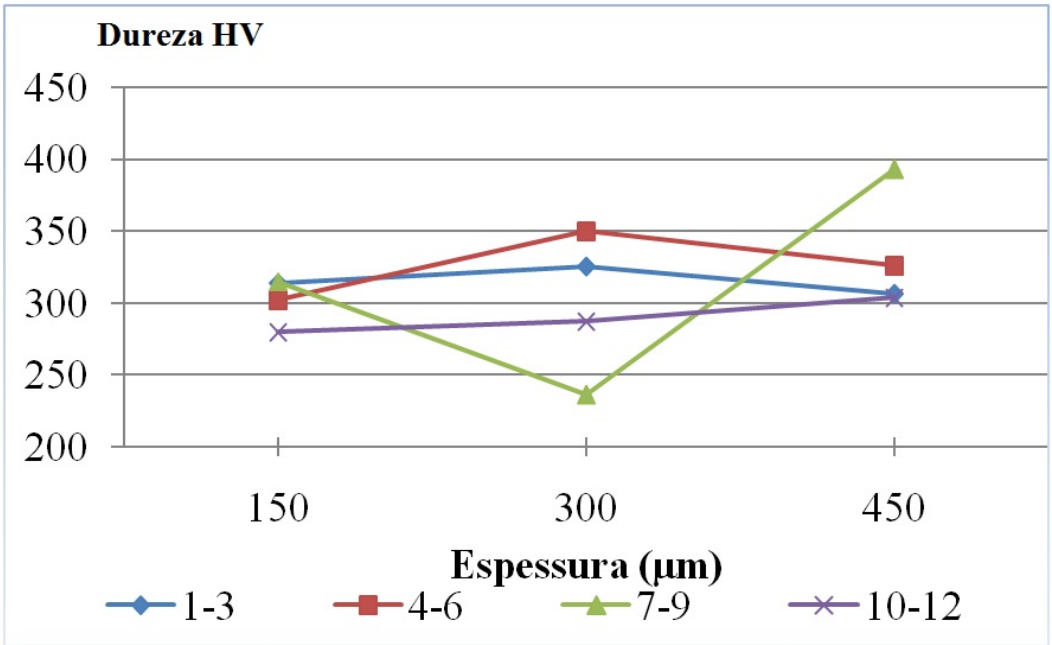
No Gráfico 4, também se observa uma certa tendência a aumentar a dureza mantendo uma proporcionalidade.

Contudo, no item a do Gráfico 4, observa-se que esta amostra apresenta uma discrepância da dureza em toda a sua segunda camada, apresentando valores mais altos que a terceira camada e valores mais baixos que a primeira camada. E no item b do Gráfico 4, observa-se que essa discrepância ocorre na espessura de 300 µm. É possível, que esse comportamento pode ter sido ocasionado devido a microestrutura formada nessa região, com poros gerando a redução mínima e com inclusões não metálicas gerando o aumento excessivo.

Gráfico 4 - Amostra 3 (a) Em Relação ao Número de Camadas; (b) Em Relação à Espessura.



(a)



(b)

3.3.4. Medidas de Microdureza para Amostra 4, Placa com Selante 2

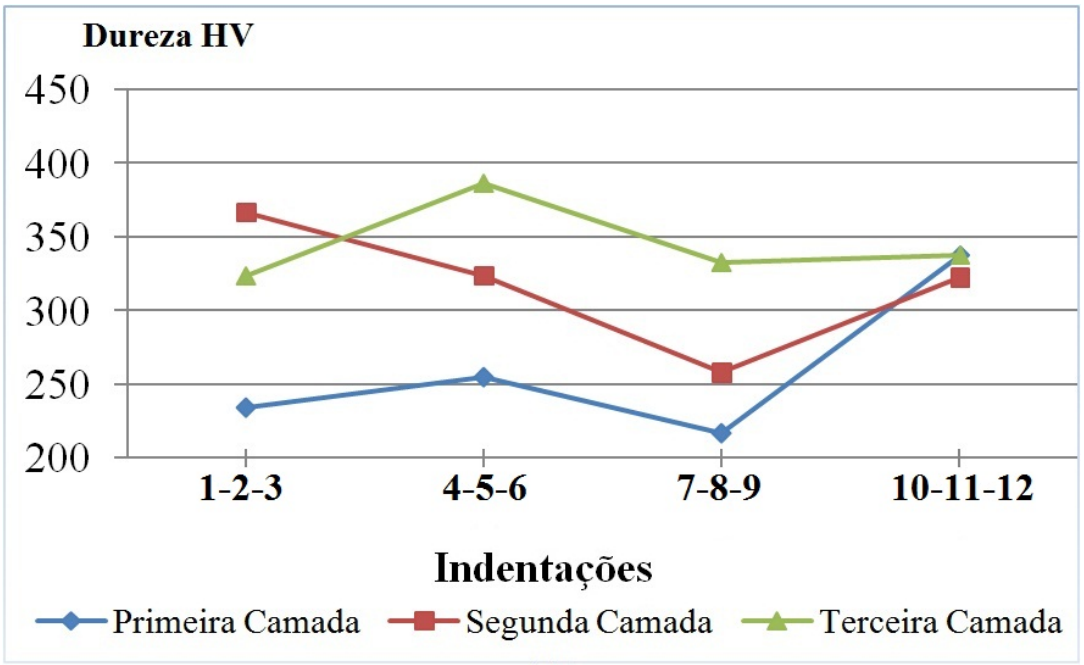
A microdureza média obtida foi de 302 HV, obtendo um valor máximo de 387 HV na indentação 6, conforme a Tabela 16.

Tabela 16 - Valores da Dureza Vickers (HV), Rockwell C (HRc) e Brinell (HB)

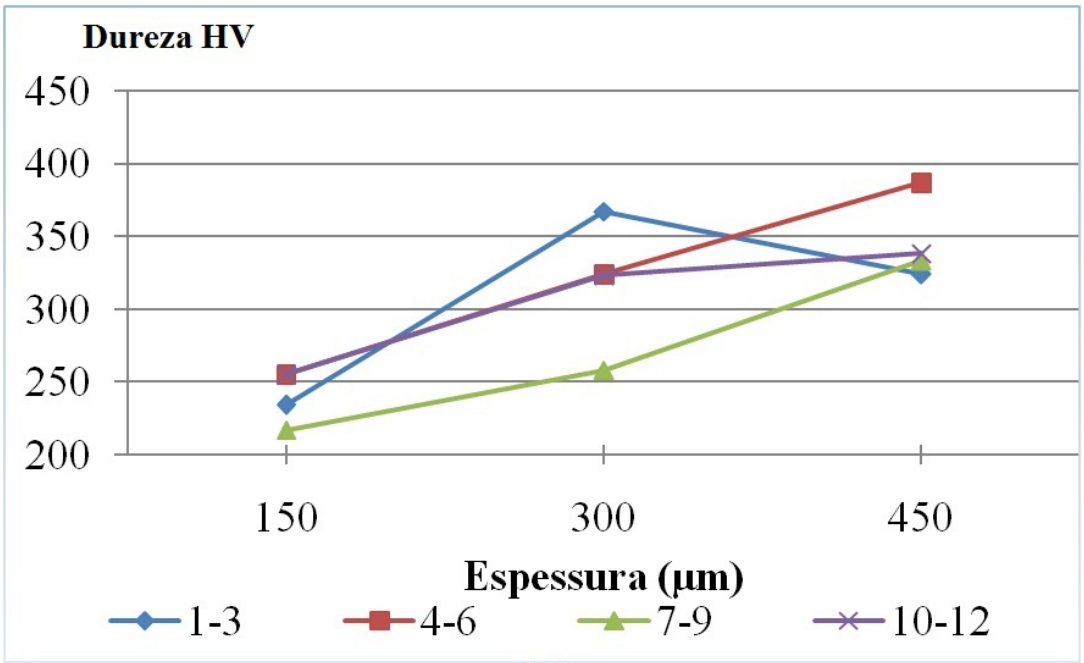
INDENTAÇÃO	D1 (µm)	D2 (µm)	DUREZA		
			HV	HRc	HB
1	63,19	62,68	234	20	226
2	50,38	50,20	367	37	344
3	54,34	52,59	324	33	311
4	64,54	55,96	255	36	336
5	53,95	53,03	324	32	301
6	48,68	49,25	387	39	362
7	64,37	66,51	217	18	213
8	60,92	58,96	258	24	247
9	52,27	53,28	333	34	319
10	59,90	60,67	255	36	336
11	53,18	53,87	323	33	311
12	57,32	47,41	338	34	342

No Gráfico 5, observa-se que amostra apresentou o comportamento ideal em relação ao aumento da dureza, podendo considerar que as discrepâncias estão ausentes por apresentarem valores mínimos. Acredita-se que esse comportamento foi devido a formação de inclusões metálicas próximas, como pode ser observado nas micrografias.

Gráfico 5 - Amostra 4 (a) Em Relação ao Número de Camadas; (b) Em Relação à Espessura



(a)

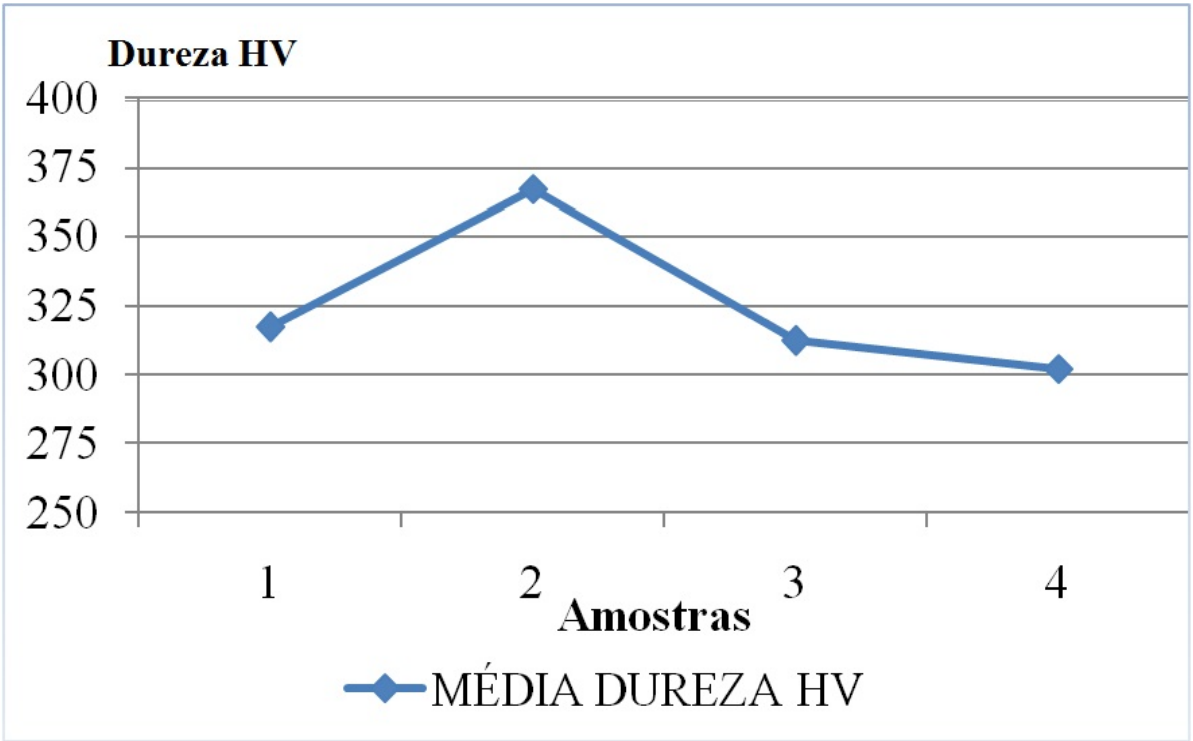


(b)

3.3.5. Comparativo entre as Amostras Avaliadas

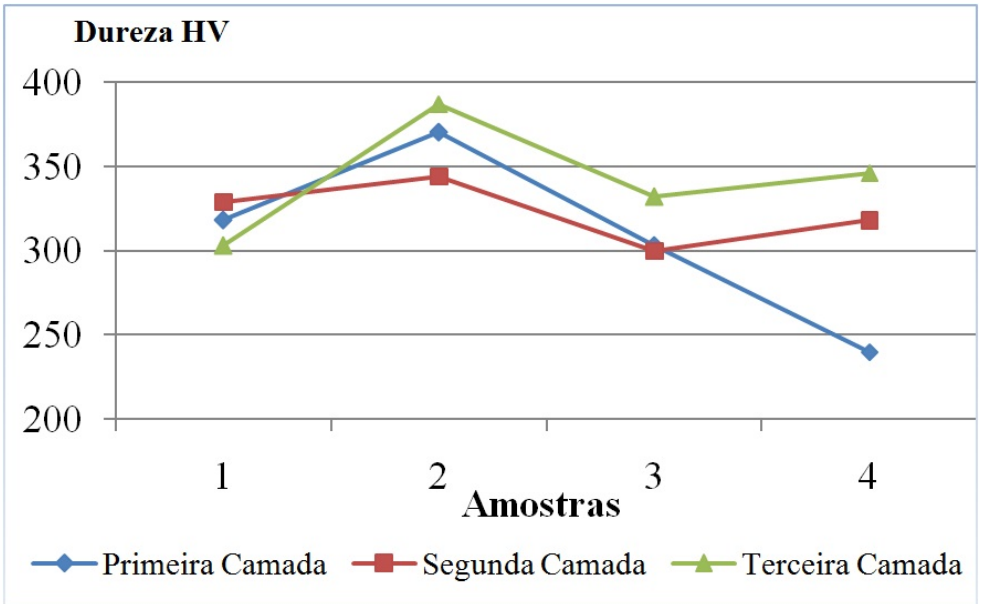
O Gráfico 6 apresenta a média global das durezas de cada amostra. O valor da microdureza média do substrato é de 132,8 HV, enquanto que o valor de microdureza média de todo o revestimento apresenta um valor mínimo de 302 HV e máximo de 367 HV. Essa comparação demonstra os benefícios adquiridos pelo processo de revestimento de materiais metálicos aspergidos termicamente em termos de dureza.

Gráfico 6 - Média Global das Microdurezas das Amostras



Somente a média global obtida no Gráfico 6 não é um dado suficiente para analisar o comportamento da dureza. Isto porque a indicação de um valor elevado da dureza necessita ser formado mantendo uma certa proporcionalidade, de maneira a indicar que possivelmente a microestrutura formada otimizou essa propriedade (inclusões metálicas). Diferentemente, quando a dureza apresenta valores com discrepâncias, indicando possivelmente que a microestrutura formada é frágil, tanto quando há tanto um aumento no seu valor (inclusões não metálicas) como quando há uma diminuição (defeitos ocasionados por poros e microtrincas) [7, 18]. Portanto foi necessário elaborar os dados do Gráfico 7.

Gráfico 7 - Padrão Médio de distribuição da Microdureza conforme o número de camadas



O Gráfico 7 representa como ocorre esse padrão de distribuição, sendo possível observar que todas as amostras possuem uma tendência a aumentar a dureza conforme aumenta o número de camadas, mantendo uma certa proporcionalidade. Este é um comportamento esperado nos Processos de Aspersão Térmica, tornando-se um diferencial. Porém, ao analisar o comportamento do maior e do menor valor encontrado para média global das microdurezas, obtem-se o seguinte resultado:

- Amostra 2, Eixo com Selante 1: essa amostra apresentou o maior valor da média global da microdureza, mas ao analisar o comportamento da sua distribuição, observa-se que essa amostra apresentou discrepâncias, aumentando de valor em toda a sua primeira camada. Neste caso, o resultado é um comprometimento da otimização das outras propriedades mecânicas ao tornar a microestrutura frágil e quebradiça neste local, possivelmente devido uma formação de camada de óxidos (inclusões não metálicas) na primeira camada do revestimento. Fato este que está de acordo com o que foi observado na micrografia dessa amostra durante a análise por Microscopia Óptica.
- Amostra 4, Placa com Selante 2: A análise dos resultados demonstra que apesar dessa amostra possuir a menor intensidade, ela apresenta um comportamento perfeitamente esperado ao manter uma proporcionalidade na distribuição da microdureza. Possivelmente esse comportamento foi devido a maior tendência da sua microestrutura em formar camadas alongadas escuras (inclusões metálicas), como pode ser verificado pela micrografia dessa amostra durante a análise por Microscopia Óptica.

Em relação ao formato, observa-se que em ambos os casos há uma tendência a manter uma proporcionalidade na distribuição da dureza, como é o esperado à atingir nos Processos de Aspersão. Porém, os eixos possuem uma certa tendência a formar mais discrepâncias em relação as placas. Provavelmente, este comportamento é devido ao tipo de microestrutura formada como pode ser observado nas micrografias das amostras.

LIMA et al. [7] relatam que normalmente é necessário usinar ou esmerilhar a amostra a ser analisada antes da realização do ensaio, a fim de evitar que surjam diferenças discrepantes no comparativo entre as medidas realizadas, diminuindo o seu valor. Essas discrepâncias podem ocorrer quando os penetradores se posicionam sobre crateras ou picos de rugosidade ainda existentes na amostra. Também é possível que algumas dessas discrepâncias possam surgir devido à poros e microtrincas no revestimento, formando uma microestrutura que tenderá a diminuir o valor da dureza medida.

A literatura demonstra [12, 38, 39] que os Processos Aspersão Térmica se diferenciam dos demais exatamente por manter uma boa relação entre otimização das propriedades mecânicas com uma elevação de dureza devido a presença de inclusões metálicas. Quando essas inclusões formadas não são metálicas, elas proporcionam uma dureza elevada, mas afetam outras propriedades mecânicas, como redução da resistência a corrosão.

De uma maneira geral, o aumento de dureza é desejável pelo processo de Aspersão Térmica, sendo que alguns processos conseguem aumentar ainda mais esse valor. De acordo com POLLNOW [1] o Processo por Arco Elétrico normalmente mantem os valores de dureza entre 345 a 392 HV (35-40 R_c) e outros como o Processo por HVOF conseguem fornecer valores ainda maiores, normalmente entre 595 a 1354 HV (55-100 R_c) para materiais não ferrosos. Esse mesmo estudo relata que a vantagem de obter uma dureza elevada pelo Processo de Aspersão Térmica deve-se ao fato dessa poder ser realizada sem prejudicar o meio ambiente quando comparada com o processo de Cromo Duro. Este último processo se caracteriza por ser um processo de revestimento eletrodepositado capaz de fornecer elevada dureza, mas não é considerado um processo eficiente e ambientalmente correto. O resultado do presente estudo é mostrado pela comparação da microdureza HV de 897 (na superfície), 906 (no núcleo) e 912 (na interface) para o revestimento de Cromo Duro e a Microdureza HV de 1070 (na superfície), 1159 (no núcleo) e 1354 (na interface) para o revestimento formado pelo Processo de Aspersão Térmica HVOF.

3.4. Análise de Defeitos no Revestimento

A análise de defeitos foi executada através de Processamento Digital de Imagem (PDI), através do ajuste de 10 micrografias com aumento de 500x para imagens com escala Typical Grayscale (2588x1830 pixel, 8 bits, 4,5 Mb) e no formato TIFF, tanto para a Amostra 2, Eixo com Selante 1, como para a Amostra 3, Placa com Selante 1. A última etapa utilizada no Processamento Digital de Imagem permitiu obter os resultados indicados pela Tabela 17, cujos valores foram calculados e geradas pela matriz Summary do Software Fiji.

Tabela 17 - Resultados de Defeitos

Nº DA IMAGEM	% ÁREA (Amostra 2, Eixo com Selante 1)	% ÁREA (Amostra 3, Placa com Selante 1)
1	3,587%	1,498%
2	4,008%	1,205%
3	2,820%	1,620%
4	2,519%	2,370%
5	4,004%	1,456%
6	2,693%	1,125%
7	3,172%	1,368%
8	3,121%	1,132%
9	2,5772%	1,179%
10	3,680%	2,949%
MÉDIA	3,218%	1,590%

Os resultados permitiram realizar a seguinte análise sobre os defeitos das duas amostras:

- Amostra 2, Eixo com Selante 1: Apresenta uma média do índice de defeitos com um valor mais alto de 3,218% quando comparado com a Amostra 3, Placa com Selante 1. Provavelmente, indicando uma certa influência do formato das amostras sobre a formação de defeitos.
- Amostra 3, Placa com Selante 1: Apresenta uma média do índice de defeitos com um valor pequeno de 1,590%, indicando provavelmente uma menor quantidade de poros.

De acordo com a análise por microscopia óptica, é possível observar que a Amostra 3, Placa com Selante 1, apresenta uma melhor formação de inclusões metálicas desejáveis para a otimização das propriedades mecânicas pela formação de uma microestrutura com aspecto de camadas alongadas escuras, apesar de possuir também defeitos. Diferentemente da Amostra 2, Eixo com Selante 1, que apresenta uma formação maior de inclusões não metálicas caracterizadas como defeitos por apresentarem uma microestrutura com aspecto de camadas alongadas claras e pontos pretos, além de poros e microtrincas. Acredita-se que os defeitos analisados pela Microscopia Óptica foram contabilizados durante a análise de defeitos, consequentemente o fato da Amostra 2, Eixo com Selante 1, apresentar uma quantidade de defeitos visualmente maior pelo resultado de Microscopia Óptica, indica que o seu valor de índice de defeitos com valor maior que a da Amostra 3, Placa com Selante 1, é aceitável.

PAREDES [3] especifica que os revestimentos de Aspersão Térmica de modo geral devem possuir uma variação do índice de porosidade de 5 a 15 % devido aos parâmetros utilizados em cada processo e que os valores pequenos dentro desse índice podem ser obtidos elevando-se a taxa de deposição das partículas aspergidas durante o processo e também com a utilização de selantes após o processo. Os Processo de Aspersão a Arco Elétrico conseguem proporcionar valores baixos de índice de porosidade sem ter a necessidade de aumentar a taxa de deposição das partículas aspergidas, por aspergir essas partículas em formato de fluxo do spray cônico, podendo também ser reduzida com a aplicação de selantes. Os resultados apresentados das médias globais das duas amostras estão de acordo com o estudo, podendo observar que esses valores estão abaixo da média de 5%.

Johnston et al. [41] e Tillmann et al. [42] realizaram estudos com relação ao comportamento das amostras com a alteração de parâmetros de aspersão térmica como, distância de aspersão, pressão dos gases de atomização principais e secundários e corrente. A faixa de porosidade encontrada por estes autores é 1 a 6%, relativamente menores que as encontradas nos Processos de Aspersão de modo geral.

KREYE et al. [46] mediram a porosidade em revestimentos de aço inoxidável X46Cr13, através da aplicação da técnica de PADI em micrografias obtidas por microscopia ótica, onde encontraram um menor percentual médio de porosidades para o revestimento obtido por chama de alta velocidade - HVCW (3%) em comparação com o revestimento depositado por aspersão por arco elétrico (4%). A menor porosidade gerada no revestimento depositado por HVCW se deve a maior velocidade das partículas projetadas, resultando em uma microestrutura mais refinada e favorecendo a formação de um revestimento com melhores propriedades em relação à aspersão por arco elétrico.

A literatura indica que os principais fatores que influenciam os teores de óxidos e porosidades são [43, 44, 45]:

- A corrente de aspersão, que quanto menor for menor será o calor gerado no processo, evitando a exposição do substrato a elevadas temperaturas. Tal parâmetro contribui para a redução do teor de óxidos;
- A tensão do processo, uma vez que quanto maior for a mesma, maior serão as gotas de metal fundido, gerando maiores lamelas. Desta forma, reduz-se a área passível de oxidação, reduzindo o teor de óxidos;
- A pressão, que apesar de não ter influenciado significativamente no resultado, mostrou melhores condições de oxidação à menores pressões;
- A distância de aspersão, que quanto menor, menor a oxidação, uma vez que as partículas fundidas estarão por menor tempo expostas ao oxigênio.

A precisão do Processamento Digital de Imagem (PDI) para analisar os revestimentos aspergidos está vinculada a área abrangida, no número de imagens a ser processado e na qualidade das imagens (tamanho e formato), dessa forma, os resultados obtidos indicam que esses parâmetros foram adequadamente selecionados para o Processo de Aspersão a Arco Elétrico.

O estudo [47] relata que a precisão desse método utilizado em revestimentos aspergidos por Processo de Aspersão Térmica a Plasma dependerá significativamente da preparação metalográfica e do procedimento de metalografia das amostras do revestimento, dos efeitos da rugosidade da superfície, da área abrangida, e do número de imagens utilizadas durante a análise. O resultado apresentou uma quantificação de defeitos mais elevada quando se aumentou o a área das imagens analisadas, especialmente quando esse índice já possuía um valor elevado em seu tamanho real. Neste caso, sugeriu-se que a utilização de 15 imagens com aumento de 1000x pode ser considerado um padrão a ser implementado em relação a seleção de imagens quando deseja-se analisar os revestimentos obtidos por esse tipo de processo, sendo capaz de oferecer resultados com uma boa relação entre tamanho e resolução.

PARCIORNIK [25] relata que a escolha de uma melhor qualidade de imagem como a High Quatization Gray Scale, é necessária para representar sinais precisos com diferentes intensidades, como por exemplo de Difração Elétrica por Microscópio Eletrônico de Transmissão (TEM). Porém, ao serem utilizadas no programa, elas apresentam dificuldades operacionais como por exemplo, as imagens podem ser lidas mas apresentam dificuldades de

processamento e elas podem ter os seus defeitos calculados, mas esses não conseguem ser salvos nesse formato, tornando necessário utilizar a typical grayscale em ambos os casos para resolver os problemas gerados.

Uma utilização muito comum e que se tornou cada vez mais popular é na determinação da porosidade em revestimentos de pulverização térmica. Isto porque, as técnicas de medição para avaliar o nível de porosidade incluem porosimetria de injeção de mercúrio, picnometria de hélio, análise de imagem, métodos eletroquímicos e dispersão de nêutrons de pequeno ângulo. Dessa forma, o Processamento Digital de Imagem (PDI) é utilizado devido à sua simplicidade e sua capacidade de determinar vários aspectos dos poros, porosidade aberta e fechada, distribuição de tamanho de poro e distribuição espacial [48].

Considerações Finais

O presente trabalho conduziu a importantes informações através dos resultados encontrados na caracterização dos depósitos por análise no MEV, MO, Microdureza e PDI de amostras produzidas pelo Processo de Aspersão Térmica à Arco Elétrico. Os resultados apresentados e as discussões pertinentes conduziram às seguintes conclusões:

Os revestimentos apresentaram boa qualidade do revestimento devido a presença de uma estrutura lamelar pois esta indica a eficiência do processo de aspersão térmica, contendo inclusões metálicas para otimizar as propriedades mecânicas e baixo percentual de defeitos, como porosidades e inclusões de óxidos.

Os selantes avaliados, copolímero e outro epóxi, indicaram bons resultados de capilaridade e penetração, principalmente o do tipo copolímero, mesmo sem a necessidade de diluição com solvente para baixar a viscosidade, sendo uma excelente alternativa em relação aos selantes tradicionais.

A variação da Microdureza ao longo da espessura do revestimento foi bastante significativa decorrente da microestrutura heterogênea (presença de defeitos). O valor da dureza média do substrato é de 132,8 HV, enquanto que o valor de mínimo de dureza médio de todo o revestimento é de 302 HV. Essa comparação demonstra os benefícios adquiridos pelo processo de revestimento de materiais metálicos aspergidos termicamente em termos de dureza.

Quanto aos valores encontrados para Processamento Digital de Imagem (PDI), as amostras na condição de eixos apresentaram um índice de defeitos em torno de 3,218%, de acordo com os resultados encontrados na literatura. No caso das amostras na condição de placas a quantidade de defeitos foi menor, 1,6%.

Portanto, é possível que os formatos dos corpos de prova influenciem a microestrutura formada nos revestimentos, tanto para otimizar as propriedades como para a formação de defeitos, indicando que durante a análise experimental dos corpos de provas, as placas possuíram uma melhor microestrutura formada em relação aos eixos.

Sugestões para Trabalhos Futuros

- Analisar os revestimentos estudados, quanto ao desgaste abrasivo;
- Utilizar os ensaios de potencial a circuito aberto e de polarização nos mesmos revestimentos aqui estudados, porém adicionar o ensaio de impedância eletroquímica. Esta técnica tem-se mostrado, segundo a literatura, bastante adequada para a análise de processos corrosivos em revestimentos metálicos aspergidos sobre substratos de aço carbono;
- Desenvolver uma técnica confiável para medição e identificação do teor de óxidos nos revestimentos metálicos;
- Utilizar outros elementos de liga, como Zn, Ti e Mg na composição do revestimento, a fim de avaliar o efeito protetor dos mesmos. Analisar revestimentos com percentuais diferentes do elemento boro (B);
- Utilizar a aplicação de selante a vácuo, possibilitando um controle maior na sua deposição, evitando assim a não uniformidade dos selantes nos revestimentos;
- Estudar corrosão seletiva, devido à maior ocorrência corrosão por névoa salina em alguns pontos específicos no revestimento;
- Analisar separadamente os defeitos encontrados (percentual de porosidade, óxidos e microtrincas) através do Processamento Digital de Imagem (PDI);
- Analisar o percentual de defeitos para revestimentos obtidos por outras técnicas de aspersão térmica, de forma a comparar com os resultados obtidos no presente trabalho.
- Avaliar a microestrutura através de microscopia eletrônica de transmissão (MET) e EBSD.

Referências

[1] POLLNOW, EDISON NUNES, "Aspersão Térmica - Um Método Limpo e Eficiente para a Substituição do Cromo Duro", Rijeza Indústria Metalúrgica, São Leopoldo, Rio Grande do Sul, Publicada em 27 de junho de 2013.

[2] http://www.metalização.eng.br/metalização/processos/, Acesso em 10 de junho de 2017.

[3] PAREDES, RAMON S. CORTES, Aspersão Térmica, Projeto de Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagem Especiais Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica, Curitiba PR, 2012.

[4] MODENESI, PAULO J; MARQUES, PAULO VILANI, Soldagem I - Introdução ao Processo de Soldagem, Projeto do Departamento de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais. 2012.

[5] MAURÍCIO BLUM, Análise da Integridade de Uniões de Juntas Coladas em Correias Transportadoras em Função da Temperatura e Velocidade, Projeto de Graduação PUCPR-Curitiba, 2008.

[6] PADILHA, ANGELO FERNANDO, Livro Materiais de Engenharia - Microestrutura e Propriedades, Hemus Livraria. Editora e Distribuidora S.A. 2ª Edição, 2007.

[7] LIMA, CARLOS ROBERTO CAMELLO; TREVISAN, ROSEANA DA EXALTAÇÃO, "Ensaio de Adesão em Revestimentos Metal-Cerâmicos Obtidos por Aspersão Térmica a Plasma", 1999.

[8] MARQUES, PAULO VILLANI, Informação Técnica Infosolda Aspersão Térmica, Universidade federal de Minas Gerais, Engenharia Mecânica, 2003.

[9] SILVA, LUCAS FILIPE; MAGALHÃES, ANTONIO G.; MOURA, MARCELO F.S.F. DE, Livro Juntas Adesivas Estruturais, Copyright, 2007.

[10] NORMA NBR 6405, Rugosidade das Superfícies, 1988.

[11] NORMA SUECA SIS 055900/67, Pictorial Surface Preparation Standards for Paiting Stell Surfaces, 1967.

[12] https://www.youtube.com/watch?v=EoI5QOZWXMg, AIDEAL PINTURAS, Máquina de Hidrojato com abrasivo, Goiana, acesso em 10 de junho de 2017.

[13] ISO 8501-01:2007, Preparation of steel Substrates before Application of Paints and Related products, Visual Assessment of Surface Cleanliness, Part1: Rust grades and Preparation Grades of Uncoated Steel substrates and of Steel Substrates after Overall Removal of Previous Coatings, 2007.

[14] FREITAS, BRUNO CAVALCANTE. Dissertação de Mestrado, Estudo das Propriedades Microestruturais de ligas de Ni-Cr e Co-Cr obtidas pelo Processo de Metalização a Arco Elétrico, Rio de Janeiro, 2015.

[15] LIMAR, CARLOS; CAMELLO, ROBERTO, Revestimentos para Barreira Térmica: Evolução e Perspectivas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UNIMEP, Santa Bárbara, São Paulo, 2014.

[16] SIEGMANN, STEPHAN; ABERT, CHRISTOPH; "100 Years of Thermal Spray: about the Inventor Max Ulrich Schoop", Surface & Coatings Technology 220, 2013.

[17] SULZER, Technical Information, "An Introduction to Thermal Spray", 2013.

[18] LIMA, C. C; TREVISAN, R, Livro Aspersão Térmica: Fundamentos e Aplicação, São Paulo, Artliber Editora, 2002.

[19] VGK Engenharia, Comunicação Interna.

[20] R.A. MAHESH; R. JAYAGANTHAN; S. PRAKASH, "Characterization of HVOF Sprayed Ni-Cr-Al-Y (0,4 wt-%) CeO_2 Coatings on Superalloys", Surface Engineering, Volume 24, No. 5, 2008.

[21] Norma ABNT 1020/NBR 6006 (Aço SAE 1020), Aço Carbono e Ligados para Construção Mecânica, 2000.

[22] ASTM E384-16, Standard Test Method for Microindentation Hardness of materials, 2016.

[23] VENDRAMININ, JOÃO CARMO, Informação Técnica ISOFLAMA, AISI 420, Tratamento Térmico e Propriedades, 2012.

[24] TERRES, CRISTHIAN JOSÉ FERREIRA, Avaliação de Revestimentos de Aços Inoxidáveis Depositados por Aspersão Térmica, Curitiba, 2006.

[25] PARCIORNIK, SIDNEI; MAURÍCIO, MARCOS HENRIQUE DE PINHO, Digital Imaging, Department of Materials Science and Metallurgy, Catholic University of Rio de Janeiro, PUC, 2012.

[26] ASTM E 45-87, Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steels, Annual Books of ASTM Standards, Section 3, Volume 03.01, ASTEM, West Conshohocken, p163-176, 1999.

[27] VREIJLING, Ph.D. Thesis, "Electrochemical Characterization of Metallic Thermally Sprayed Coatings", TNO Institute of Industrial Technology, Delft, Netherlands, 1998.

[28] LIMA, CARLOS ROBERTO CAMELLO; CAMARGO, FLÁVIO, "Estudo e Caracterização de Revestimento para Desgaste Aplicados Por Aspersão Térmica a Chama Oxicombustível de Alta Velocidade – HVOF", 1°COBEF, Curitiba, 2009.

[29] http://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo.php?codAssunto=121, INFOMET, Aços e Ligas – Inclusões não metálicas, Acesso em 10 de junho de 2017.

[30] CECHIN, ALINE CHRISTINA STEIN; Classificação Automática de Inclusões em Aço, Projeto do Departamento de Engenharia de Materiais e Metalurgia, 2010.

[31] BERNDT, C. C., BERNECKI, T; Handbook "Thermal Spray Technology", 1ª Edition, Ohio, ASM International, 2004.

[32] ANDREW, VACKEL; SANJAY, SAMPATH, "Fatigue behavior of Thermal Sprayed WC-CoCr Steel Systems: Role of Process and Deposition Parameters", Surface & Coatings Technology 315, 2017

[33] LIN CHEN; GUAN JUN YANG; CHENG XIN LI, "Formation of Lamellar Pores for Splats via Interfacial or Sub-interfacial Delamination at Chemically Bonded Region", J Thermal Spray Technology, 2017.

[34] LISCANO, SUGEHIS; GIL, LINDA; STAIA, MARIANA H, ELSEVIER, "Effect of Sealing Treatment on the Corrosion Resistance of Thermal Sprayed Ceramic Coatings", Department of Metallurgy, National Polytechnic University, Venezuela, September 2004.

[35] http://www.diamant.com.br/Selante 2, Acesso em 10 de abril de 2017.

[36] DEDAVID, BERENICE ANINA; GOMES, CARMEM ISSE; MACHADO, GIOVANNA; Dissertação de Mestrado, "Microscopia Eletrônica de Varredura - Aplicações e Preparação de Amostras", Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2007.

[37] B. WIELAGE; U. HOFMANN; S. STEINHAUSER & G. ZIMMERMANN, "Improving Wear and Corrosion Resistance of Thermal Sprayed Coatings", Surface Engineering, 1998.

[38] http://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo.php?codAssunto=121, INFOMET, Aços e Ligas – Inclusões não metálicas, acessado em 10 de junho de 2017.

[39] PADILHA, H, Dissertação de Mestrado, "Estudo sobre Revestimentos depositados por AT para Melhorar o Desempenho de Conexões Elétricas", PIPE/UFPR, Curitiba, Brasil, 2005.

[40] http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6362-elementos-quimicos-presentes-e-sua-influencia#.VyItt-lzNtQ, Elementos Químicos, Acessado em 10 de abril de 2017.

[41] JOHNSTON, A. L; HALL, A. C; MCCLOSKEY, J. F, "Effect of Process Inputs on Coating Properties in the Twin-Wire Arc Zinc Process", Journal of Thermal Spray Technology, v. 22, n. 6, pp. 856-863, August 2013.

[42] TILLMANN, W; VOGLI, E; ABDULGADER, M, "The Correlation between the Coating Quality and the Moving Direction of the Twin Wire Arc Spraying Gun", Journal of Thermal Spray Technology, v.19, n. 1-2, pp. 409-421, 2010.

[43] TERRES, CRISTHIAN JOSÉ FERREIRA, "Avaliação de Revestimentos de Aços Inoxidáveis Depositados por Aspersão Térmica", Curitiba, 2006.

[44] BRANDOLT, C. S; ORTEGA VEGA, M. R; MENEZES, T. L; SCHROEDER, R. M; MALFATTI, C. F, "Corrosion Behavior of Nickel and Cobalt Coatings Obtained by High-Velocity Oxyfuel (HVOF) Thermal Spraying on API ηCT P110 Steel", Materials and Corrosion, v. 67, n. 4, 2016.

[45] SADEGHIMERESH, E; MARKOCSAN, N; NYLÉN, P, "A Comparative Study of Corrosion Resistance for HVAF-Sprayed Fe and Co-Based Coatings", Coatings, v. 6, n. 2, p. 754-767, 2016.

[46] KREYE, H; VOYER J; KIRSTEN A; GÄRTNER F; BUSCHINELLI, A. J. A; SCHIEFLER FILHO, M. F. O, "Influência de Parâmetros de Processo na Qualidade de Revestimentos de aço X4θCr13 Aspergidos Termicamente", Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas (ABCM), Uberlândia, MG, 2013.

[47] HAO DU; JAE HEYG SHIN; SOO WOHN LEE, "Study on Porosity of Plasma-Sprayed Coatings by Digital Image Analysis Method", Journal of Thermal Spray Technology Volume 14 (4), December 2005.

[48] JO ANN GAN; CHRISTOPHER C. BERNDT, "Metallurgical and Materials Transactions", Quantification and Taxonomy of Pores in Thermal Spray Coatings by Image Analysis and Stereology, Approach 4844, Volume 44a, October, 2013.