QUANTIFICAÇÃO DE DEFEITOS ATRAVÉS DA TÉCNICA DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM EM REVESTIMENTOS METÁLICOS ASPERGIDOS TERMICAMENTE POR ARCO ELÉTRICO

ERIKA DOS SANTOS PEREIRA

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais (PPEMM) no 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 dos Materiais.

Orientador: Hector Reynaldo Meneses Costa,D.Sc.

Coorientadora: Marília Garcia Diniz, D.Sc

Rio de Janeiro

Maio de 2018

QUANTIFICAÇÃO DE DEFEITOS ATRAVÉS DA TÉCNICA DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM EM REVESTIMENTOS METÁLICOS ASPERGIDOS TERMICAMENTE POR ARCO ELÉTRICO

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais (PPEMM) no Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Mecânica e Tecnologia de Materiais.

ERIKA DOS SANTOS PEREIRA

Banca examinadora:

_____

Presidente, Prof. Hector Reynaldo Meneses Costa, D.Sc.(CEFET/RJ)

_____

Prof. Marília Garcia Diniz, D.Sc.(UERJ)

_____

Prof. Paulo Pedro kenedi, D. Sc.(CEFET/RJ)

_____

Prof. André Rocha Pimenta D. Sc.(IFRJ/RJ)

Rio de Janeiro

Maio de 2018

CEFET/RJ – Sistema de Bibliotecas / Biblioteca Central

P436 Pereira, Erika dos Santos
Quantificação de defeitos através da técnica de processamento digital de imagem em revestimentos metálicos aspergidos termicamente por arco elétrico / Erika dos Santos Pereira.—2018.
86f. : il. (algumas color.) , tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2018.
Bibliografia : f. 82-86
Orientador : Hector Reynaldo Meneses Costa
Coorientadora: Marília Garcia Diniz

1. Revestimento em metal. 2. Aspersão térmica. 3. Processamento de imagens. 4. Engenharia mecânica. I. Costa, Hector Reynaldo Meneses (Orient.). II. Diniz, Marília Garcia (Coorient.). III. Título.

CDD 672.73

Elaborada pela bibliotecária Lívia Lima CRB-7/5904

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu amor, meu marido Victor, que foi meu maior incentivador para iniciar o mestrado, e grande colaborador durante o percurso, pois me levou e buscou em várias aulas, estudou comigo quando senti dificuldade e sempre confiou no meu potencial, me oferecendo palavras de encorajamento e de amor.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela oportunidade de ingressar no mestrado na instituição pela qual tenho muito carinho, a mesma em que iniciei minha carreira profissional, fazendo o curso técnico em mecânica de 2005 a 2008. À Deus também dou graças a todos os detalhes, que tornaram a caminhada mais leve, como a conquista da bolsa de estudo patrocinada pelo CEFET/RJ, e também pela certeza da sua presença em minha vida, que me dá força, coragem, sustento emocional e principalmente sabedoria.

Ao Programa de Pós graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, que em função desta pesquisa tive a oportunidade de conhecer muitas pessoas interessantes com quem além de me oferecer ajuda tive o prazer de compartilhar também de seus saberes e, em alguns casos, também da amizade. A essas pessoas ofereço minha gratidão, pois este trabalho é também fruto das nossas trocas e por isso, também é obra de todos nós.

À integração e união entre professores de diferentes instituições Estaduais e Federais que nos permite cursar disciplinas em qualquer uma delas, assim como também fazer uso de seus laboratórios com intuito de sempre usar o melhor recurso para se obter pesquisas qualificadas. Em especial a UERJ/RJ, na qual eu passei boa parte do meu mestrado.

Ao laboratório de materiais do CEFET (LAMAT), em especial ao técnico Iron, que contribuiu com seus conhecimentos para que os ensaios fossem o mais preciso possível.

Ao meu orientador Hector, por toda dedicação a este trabalho, pelos ensinamentos e orientação a mim passados e principalmente pela sua compreensão, estímulo, bom humor e amizade que permitiu a jornada ser muito mais prazerosa.

A minha coorientadora Marília, pela amizade e por sempre estar disponível para todas as necessidades que a pesquisa requisitou e que muito contribui com sua experiência.

Por fim, agradeço ao meu marido, companheiro de todas as horas, e aos meus familiares e amigos que sempre me impulsionam pelo caminho certo.

“A sabedoria oferece proteção, como o faz o dinheiro, mas a vantagem do conhecimento é esta: A sabedoria preserva a vida de quem a possui.” Eclesiastes 7:12

Resumo

QUANTIFICAÇÂO DE DEFEITOS ATRAVÉS DA TÈCNICA DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM (PDI) EM REVESTIMENTOS METÁLICOS OBTIDOS POR ASPERSÃO TÉRMICA

ERIKA DOS SANTOS PEREIRA

Orientador: Hector Reynaldo Meneses Costa,D.Sc.

Coorientadora: Marília Garcia Diniz, D.Sc

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.

Este trabalho teve como objetivo quantificar e avaliar através de técnicas de análise e processamento digital de imagens (PDI) defeitos formados em revestimentos metálicos por aspersão térmica à arco elétrico. Adicionalmente, os revestimentos foram caracterizados em relação a resistência à corrosão e microdureza. Os revestimentos se caracterizam por ligas basicamente formadas por níquel, cromo e cobalto. As ligas de níquel e cromo são as ligas tradicionais e a de cobalto vai ser estudada como uma nova alternativa. Os estudos foram feitos com a obtenção de aspectos microestruturais e imagens em microscópio ótico (MO). As imagens obtidas foram processadas e analisadas através de técnicas de PDI utilizando o software FIJI (Image J), no qual foram obtidas porcentagens gerais de defeitos nos revestimentos testados (porosidades, redes de óxidos e trincas). Foram feitas avaliações de microdureza através Do durômetro Vickers e foi realizado também ensaio de corrosão. A porcentagem de defeitos encontrada foi dentro do esperado e os resultados indicaram que o cobalto pode ser um bom elemento para atuar como revestimento contra a corrosão, porém dependerá da combinação com quais elementos ele será integrado e qual será o meio corrosivo a ser exposto.

Palavras-Chave: Aspersão térmica, revestimentos metálicos, caracterização, PDI.

Rio de Janeiro

Maio 2018

Abstract

QUANTIFICATION OF DEFECTS BY TECHNIQUE OF IMAGE PROCESSING IN METALLIC COATINGS OBTAINED BY THERMAL SPRAYED

ERIKA DOS SANTOS PEREIRA

Advisor: Hector Reynaldo Meneses Costa

Coadvisor: Marília Garcia Diniz, D.Sc

Abstract of dissertation submitted to Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais – Centro Federal de Educacao Tecnologica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

The objective of this work was to quantify and evaluate, through techniques of analysis and digital image processing (PDI), defects formed in metallic coatings by thermal sprinkling to the electric arc. In addition, coatings were characterized in relation to corrosion resistance and microhardness. The coatings are characterized by alloys consisting primarily of nickel, chromium and cobalt. Nickel and chromium alloys are the traditional alloys and cobalt alloys will be studied as a new alternative. The studies were done with the obtaining microstructural aspects and images in optical microscope (MO). The obtained images were processed and analyzed using PDI techniques using the FIJI software (Image J), in which general percentages of defects were obtained in the coatings tested (porosity, oxide and crack networks). Microhardness evaluations were done by Vickers hardness and corrosion test. The percentage of defects found was within the expected range and the results indicated that cobalt may be a good element to act as a coating against corrosion, however it will depend on the combination with which elements it will be integrated and what the corrosive medium to be exposed.

Keywords: Thermal spraying, metallic coatings, characterization, DIP.

Rio de Janeiro

Maio 2018

Índice de Figuras

Figura 1 - Processo de aspersão térmica. Fonte: http://www.comersul.com.br/secao.php?nome=aspersao-termica data 19/05/2017 _____ *18*

*Figura 2 - Deposição de lamelas sobre o substrato. Fonte: http://www.sitedasoldagem.com.br/conceito%20basico/ data 19/05/17*_____ *19*

Figura3 - tipos de materiais de revestimento. Na sequência da esquerda para direita: pó, arame e vareta. Fonte: Estudo dos processos de aspersão térmica-Centro Universitário de Itajubá MG. _____ *19*

Figura 4 - Adesão e Coesão. Fonte: Blum [11]. _____ *23*

Figura 5 - Classificação de grupos para a aspersão térmica segundo as fontes de energia. Fonte: Brito [4]. _____ *24*

Figura 6 – Aspersão por chama convencional. Fonte: http://www.eutectic.com.br/catalogos/catalogo-metalizacao-aspersao-termica.pdf data 22/05/2017 _____ *26*

*Figura 7 – Esquema de uma tocha de AT por detonação. Fonte: Lima et al [13].*_____ *27*

Figura 8 – Tocha HVOF (esq.) e esquema de aspersão (dir.) Fonte: http://www.eutectic.com.br/catalogos/catalogo-metalizacao-aspersao-termica.pdf data 22/05/2017; Site Rijeza 22/05/2017. _____ *27*

Figura 9 – Pistola de plasma (esq.) e esquema de aspersão (dir.). Fonte: http://www.eutectic.com.br/catalogos/catalogo-metalizacao-aspersao-termica.pdf data 22/05/2017 28

Figura 10 – Tocha a laser. Fonte: http://www.cascadura.com.br/processos/laser-cladding-2 data 22/05/2017 _____ *29*

Figura 11 – Equipamento de metalização por arco elétrico de alta produtividade – Fonte:http://www.eutectic.com.br/metalizacao-aspersao-termica-eutronic-arc-spray.html data 09/01/2018 _____ *30*

Figura 12 – Funcionamento do sistema de aspersão térmica por arco elétrico – fonte: http://www.eutectic.com.br/metalizacao-aspersao-termica-eutronic-arc-spray.html data 09/01/2018 30

Figura 13 - Tipos de defeitos apresentados na condição 1, do trabalho de Brito [4]. _____ *35*

Figura 14 -Tipos de defeitos apresentados em revestimento da condição 1 com rede de óxi dos, do trabalho de Bengtson et al [17]. _____ *35*

Figura 15 -Tipos de defeitos apresentados em revestimento da condição 2, do trabalho de Bengtson et al [17]. _____ *36*

Figura 16 – MEV de revestimento aço inox aspergido termicamente por arco. Fonte: Y Fizi et al [20]. _ *37*

Figura 17 – Formas de corrosão- desenho esquemático. Fonte: http://www.icz.org.br/corrosao.php - acessado em 03/01/2018 _____ *39*

Figura 18 – Microdureza seguindo do substrato até o revestimento. _____ *43*

Figura 19 – Micrografias: (a) sem tratamento térmico; (b) depois do tratamento. Fonte: Y Fizi et al [20]. _____ *44*

Figura 20 – Amostras sequencialmente da esquerda para direita nas condições:1,3,4 e 5 conforme Tabela 2. Fonte: Própria autora. _____ *47*

Figura 21 – Selecionando área de interesse. Fonte: Própria autora. _____ *50*

Figura 22 – Ferramenta Crop. Fonte: Própria autora. _____ *50*

Figura 23 – Adequação da escala. Fonte: Própria autora. _____ *51*

Figura 24 – Duplicando imagem para comparação. Fonte: Própria autora. _____ *51*

Figura 25 – Realçando pontos de interesse. Fonte: Própria autora. _____ *52*

Figura 26 - O resultado da imagem. Fonte: Própria autora. _____ *52*

Figura 27 – Ferramenta Threshold. Fonte: Própria autora. _____ *53*

*Figura 28 – Resultado de imagem binária. Fonte: Própria autora*_____ *53*

Figura 29 – Ferramenta Binary- Open. Fonte: Própria autora. _____ *54*

*Figura 30 – Ferramenta Noise- Remove Outliers. Fonte Própria autora.*_____ *55*

Figura 31 – Resultado da imagem. Fonte: Própria autora. _____ *55*

Figura 32 – Ferramenta Analyze Particles. Fonte: Própria autora. _____ *56*

Figura 33 – Seleção de itens de interesse. Fonte: Própria autora. _____ *57*

*Figura 34 – Telas de resultados. Fonte: Própria autora.*_____ *57*

Figura 35 – Imagem Final com defeitos em destaque. Fonte: Própria autora. _____ *58*

*Figura 36 – Resultado da análise pelo Software FIJI Image J – Fonte: própria autora.*_____ *58*

*Figura 37 – imagem original (esq.), imagem tratada com defeitos selecionados (dir.) – Fonte: própria autora*_____ *59*

Figura 38 – Resultado da análise da imagem da Figura 37 obtido pelo Software FIJI Image J – Fonte: própria autora _____ *59*

*Figura 39 – Amostras em solução após 72 horas. Fonte: Própria autora.*_____ *60*

Figura 40 – Imagem em MO do revestimento da condição 1. Aumento de 500x. Fonte: Própria autora. 61

Figura 41 - Imagem em MO do revestimento da condição 3. Aumento de 500x. Fonte: Própria autora. 62

Figura 42 - Imagem em MO do revestimento da condição 4. Aumento de 500x. Fonte: Própria autora. 62

Figura 43 - Imagem em MO do revestimento da condição 5. Aumento de 500x. Fonte: Própria autora. 63

Figura 44 – identação por Microdurômetro. Fonte: Própria autora. _____ *68*

Figura 45 – Espessura da amostra 1. A esquerda antes do ensaio de corrosão e a direita depois do ensaio de corrosão. _____ *72*

Figura 46 - Espessura da amostra 3. A esquerda antes do ensaio de corrosão e a direita depois do ensaio de corrosão. _____ *72*

Figura 47 - Espessura da amostra 4. A esquerda antes do ensaio de corrosão. Fonte: Própria autora. _ 73

*Figura 48 – Espessura da amostra 5. A esquerda antes do ensaio de corrosão e a direita após o ensaio de corrosão. Fonte: Própria autora.*_____ *73*

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Valores de microdureza (HV). Fonte: Brito[4]. _____ *43*

Tabela 2 - Elementos químicos encontrados nos quatro arames usados na aspersão (% em peso). ____ *45*

Tabela 3 – Condição gerada pela combinação de arames para obtenção do revestimento. Fonte: Empresa _____ *46*

*Tabela 4 – Quantificação percentual de defeitos por área. Fonte: Própria autora e Brito [4].*_____ *65*

*Tabela 5 – Resultados do Desvio Padrão quanto a quantificação de defeitos do atual trabalho. Fonte: Própria autora.*_____ *66*

Tabela 6 – Resultados de microdureza. Fonte: Própria autora e Brito [4]. _____ *69*

Tabela 7 – Resultados do Desvio Padrão quanto o ensaio de microdureza. Fonte: Própria autora e Brito[4]. _____ *69*

Tabela 8 – Comparativo de peso das amostras antes e depois do ensaio de corrosão. _____ *71*

*Tabela 9 – Espessuras dos revestimentos antes e depois do ensaio de corrosão.*_____ *71*

Tabela 10 – Aspecto das amostras. Fonte: Própria autora. _____ *74*

*Tabela 11 – Resultados de corrosão superficial dos revestimentos em [%]. Fonte: Brito [4].*_____ *76*

Sumário

DEDICATÓRIA 3

AGRADECIMENTOS 4

Resumo 7

Abstract 8

Índice de Figuras 9

Índice de Tabelas 12

Sumário 13

Introdução 16

1.0 Revisão Bibliográfica 18

1.1 Aspersão térmica 18

1.2 A escolha dos parâmetros para processo de metalização 19

1.3 Características importantes de revestimentos metálicos obtidos por aspersão térmica 20

1.4 Liga de cobalto 21

1.5 Adesão e Coesão 23

1.6 Processos e técnicas de aspersão térmica 24

1.7 Fonte de energia por combustão: 24

1.8 Fonte de energia elétrica: 27

1.9 Vantagens e desvantagens de aspersão térmica por arco elétrico 30

1.10 Preparação da face para o revestimento através do processo de jateamento abrasivo 31

1.11 Defeitos em revestimentos metálicos 32

1.12 Corrosão 37

1.13 Classificação quanto a morfologia 38

1.14 Corrosão em água do mar 39

1.15 Ensaios de corrosão 40

1.16 Ensaio de dureza 42

2.0 Materiais e Métodos 45

2.1 Materiais 45

2.2 Preparação da amostra 46

2.3 Microscopia Ótica (MO) 48

2.4 Microdureza Vickers (HV) 48

2.5 Processamento digital da imagem (PDI) 48

2.6 Ensaio de Corrosão 59

3.0 Resultados e discussões 61

3.1 Microscopia óptica 61

3.2 Processamento digital de imagem 64

3.3 Microdureza Vickers (HV) 67

3.4 Resultados do ensaio de corrosão 71

4.0 Conclusão 78

5.0 Sugestões para trabalhos futuros 79

6.0 Referência Bibliográfica 80

Introdução

Segundo Paredes [1], a aplicação de revestimentos protetores, com finalidades de engenharia, iniciou-se para proteção de conjuntos e componentes mecânicos contra a corrosão. Com o avanço de pesquisas no desenvolvimento de novos materiais, hoje, os revestimentos são utilizados também para elevar à resistência a corrosão, ao desgaste, permitir o isolamento térmico e elétrico e contra incompatibilidades químicas e biológicas e já está sendo utilizado em revestimentos para implantes.

O desenvolvimento da tecnologia de aspersão térmica baseia-se na necessidade de prolongar a vida útil de sistemas e peças, em face o elevado custo de componentes de reposição aliado as vantagens de recuperar peças as quais se elimina a substituição Paredes [1]. E com isto, espera-se elevar o desempenho dos sistemas mecânicos em uso, os quais são cada vez mais solicitados. Sabe-se que, dentre os parâmetros de trabalho mais importantes pode-se citar a pressão e a temperatura. E para resistir a acréscimos nas solicitações térmicas e mecânicas é exigido da ciência dos materiais o desenvolvimento de ligas especificas para resistir às mais diversas condições de serviço.

Freitas [2] descreve a aspersão térmica (AT) como técnica importante na proteção de materiais contra a corrosão e o desgaste abrasivo. Trata-se de um processo que possui grande variedade de ligas para revestimento, em certos casos de baixo custo e de aplicação prática, uma vez que é possível o transporte das ferramentas, permitindo que o trabalho seja feito em campo.

Atualmente, a utilização da técnica de AT vem aumentando, devido à preocupação por parte das empresas, principalmente da área de óleo e gás, em aumentar a vida útil dos materiais expostos ao ambiente marinho severo em relação à corrosão.

Revestimentos obtidos por AT têm por finalidade atender requisitos altamente exigentes e condições de serviços agressivas que muitas vezes podem acarretar em acidentes, perda prematura de componentes e paradas de produção, por Freitas [2].

Uma estrutura típica de revestimentos aspergida é constituída de lamelas do material depositado permeando sobre estas inclusões de óxidos, micro trincas, partículas sólidas e porosidade e isto é considerado como imperfeições ou defeitos contidos em uma camada de revestimento, explica Paredes [1].

A porosidade em revestimentos é uma propriedade importante em que tange a resistência à corrosão, uma vez que a proteção do substrato contra o meio agressivo depende, em parte dela, Explica Vreijling [3]. A presença de porosidade, trincas e fissuras no revestimento, são consideradas falhas que irão gerar uma permeabilidade nociva na camada protetora do substrato. A resistência à corrosão e suas presenças são função de parâmetros do processo, afirma Brito [4].

Neste trabalho foi abordada a técnica de aspersão térmica por arco elétrico. Essa técnica apresenta algumas vantagens em relação as demais técnicas de aspersão, como a sua alta taxa de deposição e o menor custo. Foi avaliado a quantificação de defeitos, como poros, trincas e oxidação através de PDI (Processamento Digital de Imagem). Também foi avaliado a microdureza do revestimento ao longo de sua espessura e feito análise de corrosão qualitativa, onde se analisou o aspecto antes e pós o ensaio.

1.0 Revisão Bibliográfica

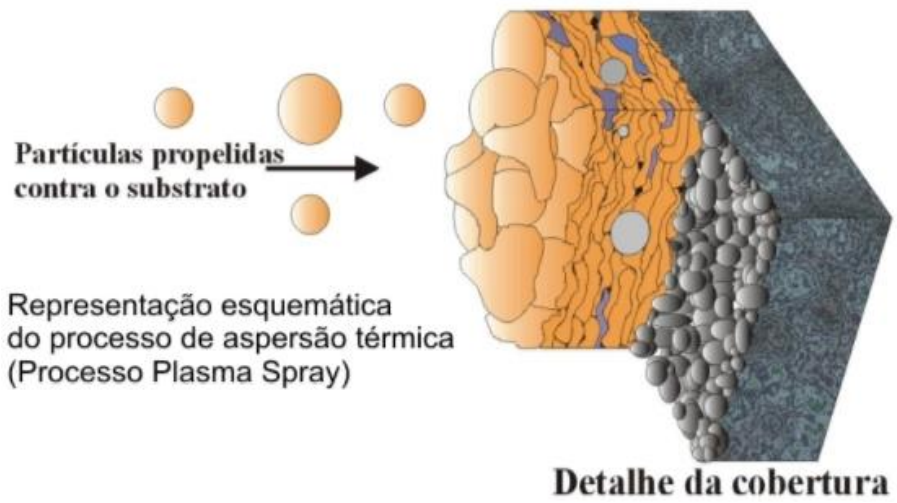
1.1 Aspersão térmica

O processo de aspersão térmica também conhecido como “metalização”, foi desenvolvido em 1909 e patenteado pelo engenheiro M. U. Schoop, descrevem Siegmann et al. [5]. O processo consiste em revestir um substrato adequadamente preparado, para a proteção do mesmo, quanto ao seu desgaste excessivo e corrosão. O material aplicado sobre o substrato é elevado ao seu estado de fusão ou próximo, por meio de uma fonte de calor gerada no interior ou no bico de uma pistola. Após a fundição as partículas do material são aceleradas através de gases sob pressão até a face preparada do substrato, onde as mesmas irão formar camadas de geometrias lamelares. Para Brito [4], qualquer material metálico que não se decomponha ao atingir seu estado de fusão pode ser utilizado como revestimento.

Esses materiais aspergidos podem estar em forma de pó, arame ou vareta e são aquecidos por meio de uma pistola ou maçarico. A Figura 1 esquematiza as etapas do processo de aspersão térmica, a Figura 2 esquematiza a geometria das partículas aspergidas sobre um substrato e a Figura 3 mostra as formas em que os arames utilizados para aspersão térmica podem ser comercializados.



Figura 1 - Processo de aspersão térmica. Fonte: http://www.comersul.com.br/secao.php?nome=aspersao-termica data 19/05/2017



Nota: As regiões em coloração diferente dentre as partículas propelidas são partículas não fundidas.

Figura 2 - Deposição de lamelas sobre o substrato. Fonte: http://www.sitedasoldagem.com.br/conceito%20basico/ data 19/05/17



Figura 3 - tipos de materiais de revestimento. Na sequência da esquerda para direita: pó, arame e vareta. Fonte: Estudo dos processos de aspersão térmica-Centro Universitário de Itajubá MG.

1.2 A escolha dos parâmetros para processo de metalização

Para definição dos parâmetros usados no processo de aspersão térmica devem ser levados em conta a fonte de energia e o gás que serão utilizados, como também seu objetivo fim. Paredes [1] mostrou que a fonte e o gás utilizados para a pulverização de alumínio geram comportamentos de proteção contra corrosão diferentes. Esta observação contribui para uma melhor compreensão das diferenças entre os processos de spray de chama (FS) e arco elétrico (EA) que provou ser um processo fácil de usar e oferece uma

alternativa duradoura nas operações de manutenção. Em seu trabalho, os revestimentos foram analisados por XPS (espectroscopia fotoelétrica de raio X), que revelou diferentes camadas de óxidos gerada sobre as superfícies resultantes dos processos de deposição. Para aprofundar a investigação sobre as diferenças relativas à fonte de calor utilizada, os revestimentos foram submetidos a um ensaio de corrosão por névoa salina de 4000 horas.

Os produtos de corrosão formados na superfície dos revestimentos foram avaliados com base em registros fotográficos, MEV (microscopia eletrônica de varredura), XPS e difração de raios X. A análise XPS do revestimento de alumínio depositado pela técnica EA indicou que a camada de óxido / hidróxido de alumínio persistiu por um tempo de pulverização mais longo na lamela do que naquele depósito por FS. Essa diferença também pode indicar a formação de diferentes compostos de alumínio. O ensaio de névoa salina de 4000 horas causou um maior escurecimento dos revestimentos depositados pela EA (corrosão do alumínio) do que em aqueles depositados pela FS, que apresentaram corrosão mais uniforme, com escurecimento ocorrendo apenas em alguns pontos localizados. Pôde-se concluir que os revestimentos depositados pela EA apresentaram perda de espessura quando submetidos a névoa salina. Os revestimentos depositados por FS sobre substrato pré-aquecido mostrou produtos de corrosão aderindo fortemente à superfície, enquanto os revestimentos depositados pela EA sem pré-aquecimento, o substrato mostrou apenas produtos de corrosão de adesão fraca.

1.3 Características importantes de revestimentos metálicos obtidos por aspersão térmica

Quanto as propriedades mecânicas de revestimentos obtidos por aspersão térmica destaca-se a dureza, propriedade diretamente ligada a resistência mecânica do material. Virgil Geamăn et al. [6] estudaram as propriedades microestruturais e de dureza dos revestimentos Ni-2Al depositados em aço, ferro fundido e substratos de liga de duralumínio usando o método de pulverização térmica de arco elétrico e do medidor Vickers, com carga de 0,1HV para avaliação de dureza. A porosidade dos revestimentos de Ni-2Al depositados em substrato de liga de duralumínio apresentaram um nível baixo comparados com revestimentos depositados em aço e ferro fundido como substratos, porém a microdureza foi maior na interface de revestimentos com aço e ferro como

substrato. Os valores de dureza dos revestimentos estavam da faixa de 120 – 240 HV0,1. Os valores de dureza do substrato variam entre 180 e 250 HV0,1 para aço, 200 e 260 HV0,1 para ferro fundido e entre 120 e 160 HV0,1 para liga de duralumínio.

Os aspectos de resistência a corrosão são muito importantes para revestimentos metálicos. Materiais de engenharia podem estar sujeitos à ambientes agressivos, tais como equipamentos submersos, peças utilizadas em indústrias químicas, pontes, indústrias offshore que, no geral, se expõem ao ambiente marinho severo, explicam Brito et al. [7]. O processo de degradação ocorre facilmente se os materiais não são resistentes à corrosão ou se não possuem um sistema de proteção adequado. Com isso, o revestimento metálico por aspersão térmica vem amplamente sendo utilizado e estudado, justificam Brito et al. [7].

1.4 Liga de cobalto

Ligas à base de cobalto destacam-se na confecção de revestimentos por aspersão térmica. Brito [4] ao avaliar propriedades de revestimentos por aspersão térmica concluiu que o aumento de cobalto na liga diminui a sua porosidade, que variou entre 4,7% e 1,6%. A técnica utilizada foi a de contagem por poros em malhas de 100 pontos. Brito [4] também concluiu que revestimentos com porcentagem significativas de cobalto tiveram maior valor de microdureza e maior resistência à corrosão, indicando a eficiência do elemento.

Já Brandolt [8] estudou a influência de níquel e cobalto, pela característica de baixas temperaturas de fusão, importante para que os revestimentos obtidos apresentem boa compactação e aderência. Os resultados indicaram que ambos os revestimentos apresentaram uniformidade química, baixa porosidade e pouca presença de defeitos. A análise microestrutural foi feita através de microscopia ótica (MO) e software Axion Vision, obtendo como resultado 0,82 % de poros no revestimento a base de cobalto e 0,31% no revestimento de níquel. Foi observado que no revestimento a base de cobalto as maiores porosidades se encontravam mais na superfície e que no de níquel as maiores porosidades se apresentavam mais na interface entre o revestimento e o substrato.

Brandolt [8] Também descreve as ligas a base de cobalto como de grande resistência a corrosão e resistência a altas temperaturas, assim como as ligas a base de

níquel. As primeiras destacando-se por ter sua aplicação onde a resistência ao desgaste é exigida. O cobalto, por ser um elemento relativamente raro na crosta terrestre, tem alto valor de mercado e estudos vem buscando novas formas de sua obtenção. Segundo Berndt e Bernecki. [9], devido a uma grande variedade de materiais de deposição, existe também uma ampla diversidade de aplicações e restrições, como por exemplo:

- Revestimento para resistência ao desgaste (abrasão, cavitação, erosão, etc.);
- Isolamento térmico: os revestimentos usados como barreiras térmicas são feitos de zircônio e/ou óxidos de alumínio de baixa condutividade térmica, os quais são depositados para reduzir a alta condutibilidade térmica encontrado no metal de base;
- Resistência à corrosão: alumínio, zinco, e liga de níquel – cobalto;
- Restauração dimensional de eixos e cilindros de laminação;
- Revestimentos para implantes médicos;
- Revestimentos com polímeros usados na proteção contra ataque químico, corrosão ou abrasão.

Antunes et al [10] explicam que materiais pulverizados são mais duros e mais resistentes ao desgaste, que quando fundidos ou forjados do mesmo material. Isto se deve à presença de óxidos na camada de revestimento, à combinação de endurecimento e têmpera que as partículas pulverizadas sofrem no instante do impacto. O material passível de têmpera auxilia na formação de fase mais dura, fases metaestáveis e grãos finos no interior das camadas aspergidas.

Metais, óxidos, cerâmicos, vidros, a maioria dos plásticos e madeiras são alguns tipos de substratos sobre os quais os revestimentos podem ser aspergidos termicamente.

Brito [4] em seu trabalho, descreveu que nem todos os materiais para aspersão podem ser aplicados sobre qualquer tipo de substrato. Além disso, é necessária a correta preparação do material de base (substrato) para o processo de aspersão de revestimento.

1.5 Adesão e Coesão

Para Paredes [1], as ligações geradas entre partículas aspergidas e entre estas e o substrato envolvem fatores mecânicos, metalúrgicos e químicos sendo possível analisá-las por meio da adesão e da coesão, conforme a Figura 4.

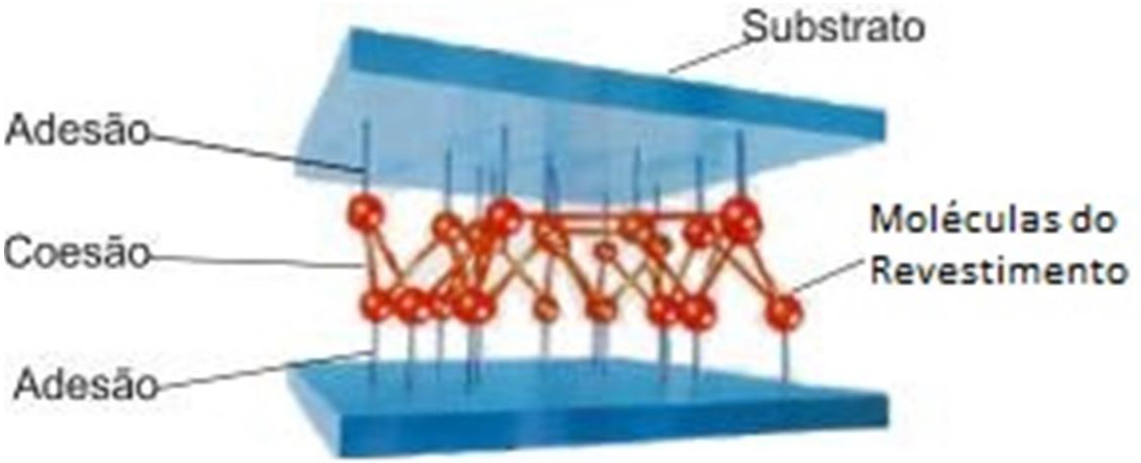


Figura 4 - Adesão e Coesão. Fonte: Blum [11].

De acordo com Blum [11] e Padilha [12], as moléculas diferentes são atraídas pela propriedade da adesão, que forma ligações químicas. No Processo de aspersão térmica ela ocorre entre a camada de revestimento e a superfície do substrato.

Já a coesão, Padilha [12] explica que se caracteriza pela capacidade do material de permanecer unido, resistindo à segregação, isto é, define-se pela força de atração entre moléculas de mesma composição. Podendo ocorrer no interior do substrato e no interior do revestimento.

É esperado que numa eventual fratura fosse preservado o substrato, logo, o ideal é que a adesão seja sempre maior que a coesão. Já a coesão do revestimento menor que a do substrato, afirmam Lima et al. [13].

Marques [14] complementa que a intensidade da adesão e da coesão sofre influência de outros fatores, tais como: o material do revestimento - cujas propriedades químicas e físicas variam conforme o tipo de material, a velocidade no impacto das

partículas no processo de aspersão, a superfície a ser revestida, a forma do substrato, e as reações físicas e químicas que ocorrem na formação da camada de revestimento.

1.6 Processos e técnicas de aspersão térmica

Os processos de aspersão térmica são divididos em dois grupos de acordo com a fonte de energia: Combustão ou energia elétrica - em cada grupo existem três tipos de processos.

O histograma da figura 5 mostra a classificação segundo Brito [4].

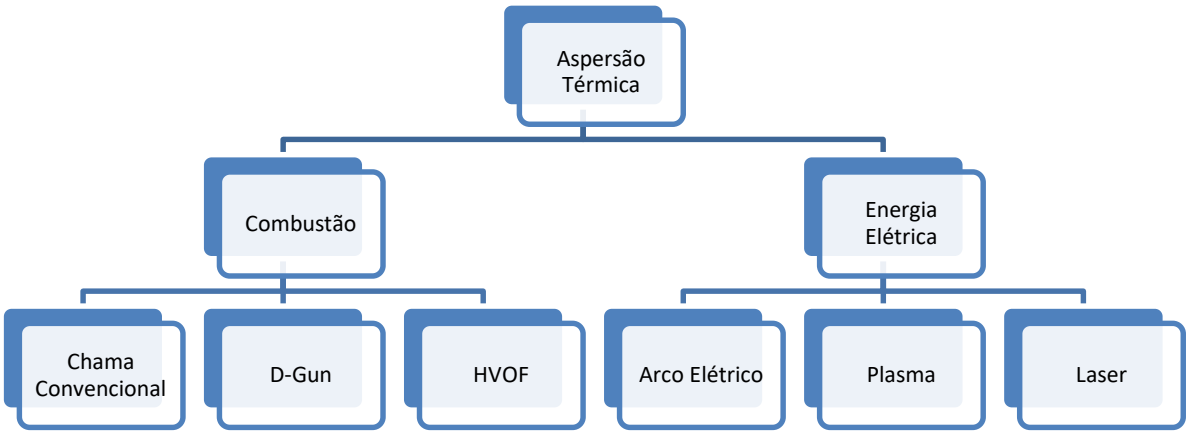


Figura 5 - Classificação de grupos para a aspersão térmica segundo as fontes de energia. Fonte: Brito [4].

Nota:

D-Gun - Aspersão por detonação.

HVOF - Chama de oxi-gás de alta velocidade

1.7 Fonte de energia por combustão:

Para Brito [4] estes processos são caracterizados por utilizarem em seu modo de aquecimento e fundição do material de revestimento, a queima de gases combustíveis, sendo mais comum o gás propano, acetileno ou hidrogênio, combinados com o oxigênio.

•Chama convencional:

Este processo, FS (Flame Spray – Aspersão por chama), também conhecido como processo à chama oxiacetilênica, utiliza a energia gerada pela combustão de um gás combustível misturado com oxigênio para fundir o material de deposição, este último pode ser na forma de pó ou arame (sólido ou tubular). Os materiais para aspersão sobre o substrato podem ser metais, ligas metálicas, materiais cerâmicos e até alguns polímeros.

O processo de FS utilizando o material de aporte na forma de pó possui a alimentação de gás de forma axial e a alimentação do pó para a pistola é geralmente por gravidade, na qual as partículas têm a mínima velocidade necessária no momento do encontro com a chama.

E neste instante, isto é, no momento em que as partículas do pó são atingidas pelo gás quente, ocorre a fusão das mesmas e um jato de ar comprimido as projeta contra o substrato.

Ao utilizar FS com pó o revestimento tem menor resistência adesiva e coesiva, logo maior porosidade em geral. Isto devido a menores velocidades alcançadas pelas partículas.

Logo, as aplicações recomendadas são quando utilizadas com materiais chamados autofluxantes (boretos e carbonetos de silício), principalmente as ligas a base de níquel. Então, após serem depositados materiais com estas ligas, com auxílio de maçaricos ou fornos, o revestimento é aquecido até seu ponto de fusão, atingindo sua densificação e aderência desejada. Observa-se que a camada deste revestimento é limitada até as faixas de temperatura de fusão sem que haja a descamação.

O pó de alimentação pode ser um metal puro, uma liga, um compósito, uma cerâmica, um carboneto ou qualquer combinação destes, com uma taxa de alimentação que pode variar de 50 a 100 g/min e com taxa de fluxo de gás de transporte entre 3 a 5 l/min, Paredes [1].

Chama utilizando arame - (Flame Spraying) – Neste processo, a alimentação do material de aporte (arame ou vareta) é conduzido de maneira uniforme até o bico da pistola através de roletes, onde em contato com a tocha é fundido. A movimentação dos roletes pode ser através de turbinas de ar comprimido, motor elétrico, ou sistema pneumático. Brito [4] cita que os gases utilizados para combustão são unicamente para a fundição do arame ou vareta, diferente do processo alimentado a pó, que usa os gases para

aceleração do material ao substrato. A aceleração das partículas fundidas é feita através de um sistema de ar comprimido no qual atinge uma velocidade superior ao do processo alimentado por pó, em torno de 200 m/s, podendo em casos restritos a utilização de gases inertes para minimizar ou até mesmo sanar a oxidação, sabendo que é prejudicial à aderência e formação das lamelas na estrutura do revestimento. Os arames ou varetas possuem um diâmetro entre 3 a 6 mm, sendo normalmente utilizados os materiais com baixo teor de oxidação tais como, molibdênio, alumínio, zinco, bronze, aços inoxidáveis e aços com alta resistência a desgaste.

Abaixo a figura 6 mostra o sistema de metalização por chama convencional.



Figura 6 – Aspersão por chama convencional. Fonte: http://www.eutectic.com.br/catalogos/catalogo-metalizacao-aspersao-termica.pdf data 22/05/2017

D-gun:

Consiste basicamente de um tubo longo resfriado com água gelada com injeção de gases combustíveis e pó no interior do tubo. Uma vela de ignição é responsável por acender a mistura de gases e a detonação resultante aquece e acelera o pó para uma velocidade hipersônica através do tubo. Um pulso de nitrogênio é usado para interromper a combustão após cada detonação. Este processo repete-se várias vezes e pode ser observado na figura 7 a seguir.

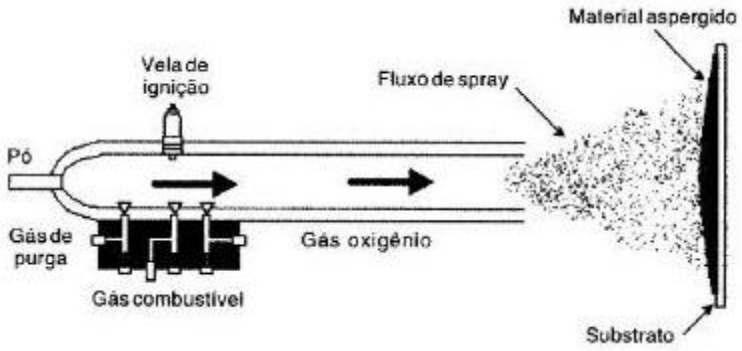


Figura 7 – Esquema de uma tocha de AT por detonação. Fonte: Lima et al [13].

•HVOF:

Processos de funcionamento contínuo caracterizados pela existência de uma câmara de combustão e pela utilização de pó como consumível. Aplica jatos de gases de combustão em altíssima velocidade (supersônicos) capaz de conduzir o material em forma de pó até o substrato nas velocidades necessárias para obter revestimentos de alta densidade, baixa porosidade (menor que 1% em fração volumétrica) e elevada adesão ao substrato. Na figura 8 é mostrado a tocha HVOF e seu esquema de aspersão.

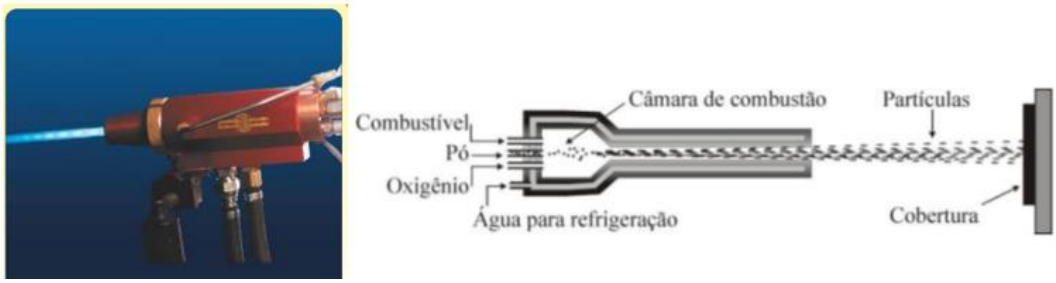


Figura 8 – Tocha HVOF (esq.) e esquema de aspersão (dir.) Fonte: http://www.eutectic.com.br/catalogos/catalogo-metalizacao-aspersao-termica.pdf data 22/05/2017; Site Rijeza 22/05/2017.

1.8 Fonte de energia elétrica:

As fontes de energia elétrica no processo de aspersão térmica são:

Plasma:

Brito [4] descreve este processo como um gás ou mistura de gases percorre através de um catodo de tungstênio e um anodo de cobre, dotado de um orifício, alinhados

coaxialmente. Ao passar, o gás é aquecido, gerando o plasma. Através de um jato de alta velocidade o pó é alimentado no plasma e acelerado, em direção ao substrato. Em geral, os gases de proteção utilizados são o argônio ou o nitrogênio, podendo haver a adição de hélio ou oxigênio para elevar sua potência e velocidade.

É ilustrado na figura 9 uma tocha de plasma e seu esquema de aspersão.

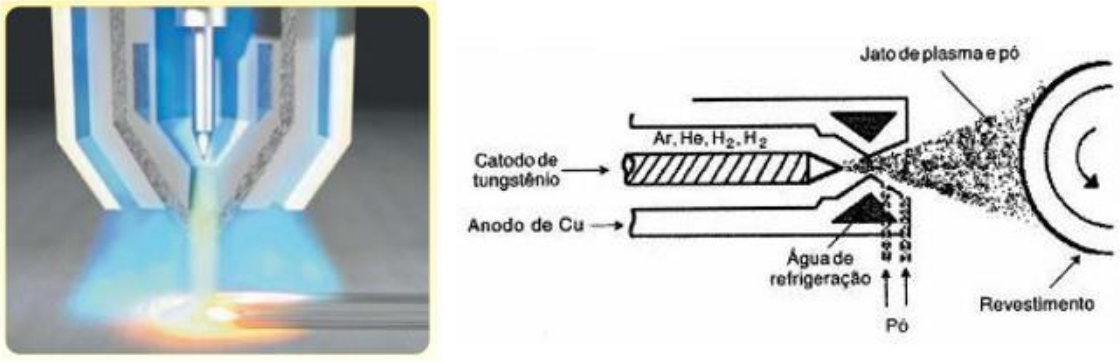


Figura 9 – Pistola de plasma (esq.) e esquema de aspersão (dir.). Fonte: http://www.eutectic.com.br/catalogos/catalogo-metalizacao-aspersao-termica.pdf data 22/05/2017

Laser:

Esse processo também recebe o nome de aspersão PROTAL (Projeção Térmica Assistida por Laser), consiste na junção de limpeza, ativação e faixas de camada num único processo, caracterizando-o com aspectos mais econômicos, rápidos e menos prejudiciais ao ambiente de realização, Brito [4].

Na figura 10 pode-se observar uma tocha a laser.

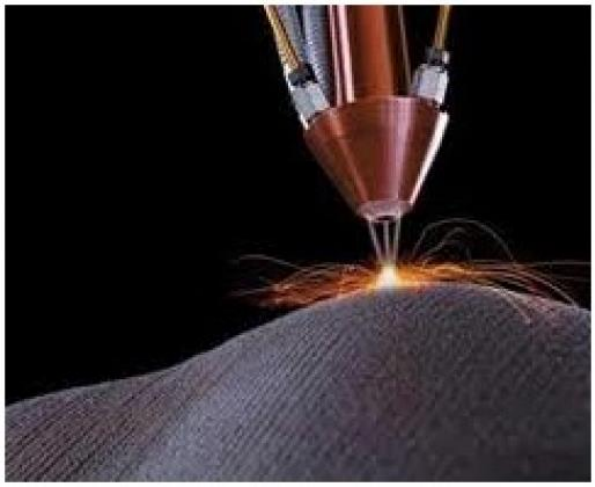


Figura 10 – Tocha a laser. Fonte: http://www.cascadura.com.br/processos/laser-cladding-2 data 22/05/2017

(ASP) - Arc Spray Process – Arco Elétrico:

Também conhecido como Arco Arame, é baseado na utilização de ligas metálicas, que através de uma diferença de potencial que varia entre 18 e 40 V gera uma fonte de calor. Esta é projetada em um bico de uma pistola, local onde são inseridos dois arames simultaneamente (um lado do arame é anodo e o outro catodo) que serão fundidos e depositados na superfície a ser aspergida. Os arcos são atomizados por meio de um jato de ar comprimido em alta velocidade, que direciona o material até a superfície a ser revestida, Paredes [1].

O avanço desse tipo de processo tem ocorrido na alimentação contínua de arame, tendo como ênfase a utilização de um motor elétrico ao invés de usar unicamente o ar comprimido, melhorando a estabilidade do arco e a extensão da chama.

Brito [4] resume que os processos por energia elétrica são caracterizados por utilizarem em seu modo de aquecimento a fundição do material e a diferença de potencial elétrico.

O equipamento de metalização por arco elétrico pode ser observado na figura 11 abaixo.

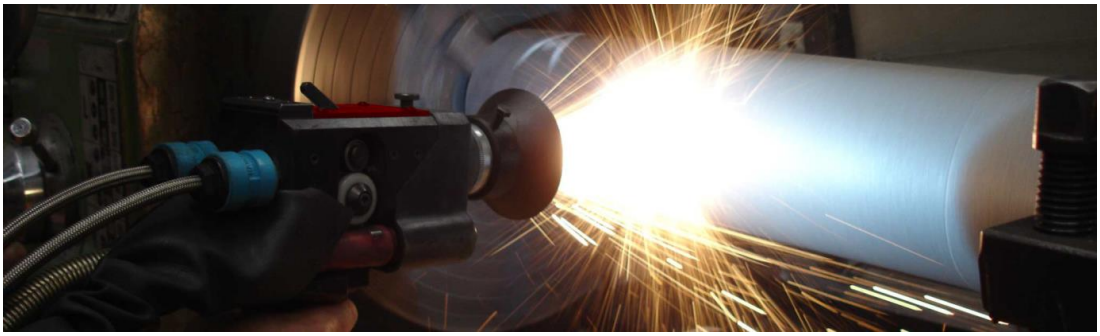


Figura 11 – Equipamento de metalização por arco elétrico de alta produtividade – Fonte:http://www.eutectic.com.br/metalizacao-aspersao-termica-eutronic-arc-spray.html data 09/01/2018

A seguir é ilustrado, na figura 12, o sistema de aspersão térmica por arco elétrico.

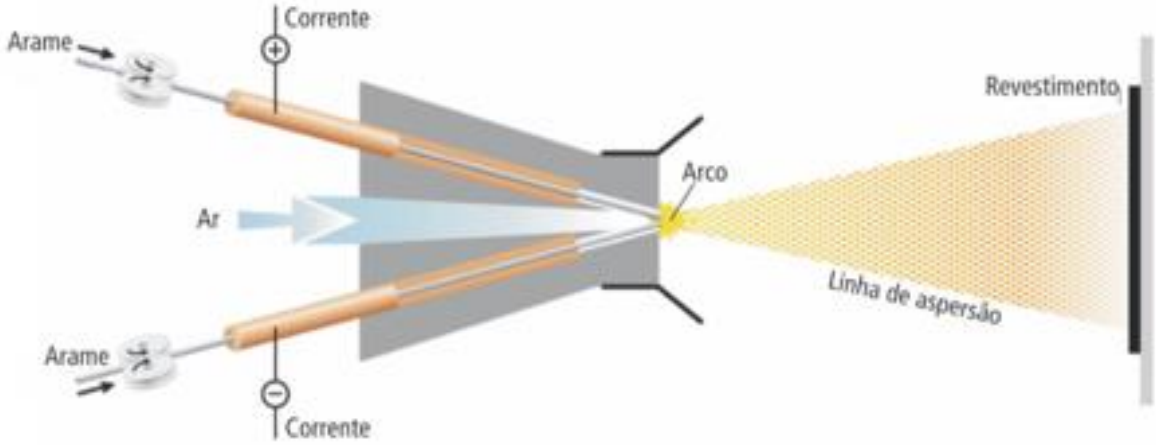


Figura 12 – Funcionamento do sistema de aspersão térmica por arco elétrico – fonte: http://www.eutectic.com.br/metalizacao-aspersao-termica-eutronic-arc-spray.html data 09/01/2018

1.9 Vantagens e desvantagens de aspersão térmica por arco elétrico

A seguir serão descritas as vantagens e desvantagens do processo de aspersão térmica, por Montani [15].

- Vantagens:

A aderência entre o material de aporte e o substrato no processo de arco elétrico atinge um ótimo resultado, alcançando entorno de quatro vezes mais que o processo de chama convencional;

Índice de deposição é alto, e isso se dá ao fato da utilização de correntes e tensões contínuas, e dois arames ao invés de um apenas, deixando essa operação com um custo mais baixo em grandes superfícies e geralmente com menor coesão interlamelar;

Máquina portátil e de fácil manutenção;

Fornece revestimentos mais espessos e de menores custos operacionais do que o plasma;

Altas taxas de pulverização de materiais, substratos relativamente frios, e os custos de consumo inferior ao de outros processos.

- Desvantagens:

Comparado com outros processos de aspersão térmica a camada aplicada apresenta maior teor de óxido e de porcentagem de porosidade.

Os revestimentos possuem rugosidade mais elevada, porém pode ser controlada;

Pode ocorrer a oxidação das partículas quando transportadas pelo ar comprimido, prejudicando a aderência. Quando isso ocorrer, é aconselhável o uso de gás inerte para transportar as partículas.

1.10 Preparação da face para o revestimento através do processo de jateamento abrasivo

A limpeza da superfície a ser aspergida é a etapa mais importante, pois a adesão do revestimento está diretamente ligada à sua limpeza e rugosidade. Inicialmente devem-se retirar contaminantes superficiais, como ferrugem, películas de óxido, umidade, poeira, óleo, graxas, tintas e pinturas. Depois de tal retirada, à limpeza deve ser mantida até que o ciclo se complete. As peças devem estar sem a presença de marcas de dedos, tendo de ser manuseada com materiais limpos. O jateamento abrasivo é o processo mais adequado, consiste no choque das partículas abrasivas direcionadas a superfície a ser aspergida com velocidade elevada. A principal finalidade deste jateamento é aumentar a rugosidade da superfície e com um isto facilitar o ancoramento do material aspergido. O recomendado é que se utilizem abrasivos a base de óxido de alumínio, devendo estes estarem secos, pontudos, limpos e cortantes, explica Alencar [16].

1.11 Defeitos em revestimentos metálicos

Revestimentos metálicos obtidos por aspersão térmica podem conter alguns defeitos, isto é, alguns itens considerados deletérios. Trincas, redes de óxidos e poros interconectados são considerados presenças indesejáveis, pois diminuem a resistência à corrosão, alteram a dureza e são sempre descontinuidades fragilizadoras. O controle dos parâmetros de processos de revestimento por aspersão térmica buscam mitigar e minimizar a presença destes defeitos e, dentro deste contexto, alguns processos são considerados melhores que outros, Bengtson et al [17].

A presença de poros em revestimentos obtidos por aspersão térmica pode ser caracterizada por análise qualitativa de imagens e / ou por técnica de análise e processamento digital de imagens devido ao alto contraste entre a tonalidade escura dos poros e a tonalidade mais clara do *background* do material de revestimento. Segundo Bengtson et al. [17], defeitos microestruturais, identificados por imagens de microscopia eletrônica de varredura (SEM – Scanning Electron Microscopy), em revestimentos de barreira térmica por plasma puderam ser correlacionados com a temperatura de pulverização. Foi estudado substrato à base de níquel com revestimento de liga de NiCrAIY (barreira térmica) e mais uma camada superior de 1,5 de Zircônia. A geometria dos grãos que formaram o revestimento eram de estrutura colunar orientados perpendicularmente à interface entre o revestimento de ligação e o revestimento superior. A Microscopia eletrônica de transmissão (TEM – *Transmission Electron Microscopy*) foi utilizada para determinar a largura dos grãos na parte superior do revestimento mais externo, onde prevaleceu uma temperatura estacionária. Concluíram que revestimentos pulverizados em altas temperaturas geraram grãos colunares relativamente grandes. Poucas delaminações horizontais se desenvolveram dentro das lamelas do revestimento, e poucas microfissuras verticais foram encontradas. Contudo, a baixas temperaturas os grãos ainda eram colunares, mas consideravelmente menores. Delaminações horizontais ocorreram dentro e entre as lamelas, e a densidade das microfissuras verticais era consideravelmente maior.

O estudo de Wei-Wei Zhang et al. [18] mostrou como a morfologia, o padrão de orientação e a relação de aspecto de poros em revestimentos de barreira térmica (TBCs)

afetaram significativamente o desempenho de isolamento térmico. No trabalho, a análise de elementos finitos foi utilizada para compreender o efeito de isolamento térmico dos poros e correlacionar a condutividade térmica efetiva com a morfologia da estrutura. Em resumo, para proporção de volume dado, um poro retangular perpendicular ao fluxo de calor tem o maior efeito sobre o desempenho quanto ao isolamento térmico, enquanto o efeito é menor para um poro de mesma forma paralelo ao fluxo de calor. Os resultados mostraram que os poros em 2D entre as camadas de revestimentos afetam predominantemente o calor a ser transferido para a camada superior. A conclusão mais importante deste trabalho foi a de que quanto maior a relação de aspecto dos poros, melhor o seu desempenho de isolamento térmico.

No trabalho de Pavel et al. [19], embora a quantificação da porosidade tenha sido obtida usando estudos de micro tomografia computacional (CMT) de alta resolução e análise de processamento digital de imagens, a informação sobre a distribuição do tamanho dos poros foi realizada usando-se uma técnica de dispersão de raios-X de ultrapequenos ângulos (USAXS). O uso destas técnicas mostrou uma nova direção para a caracterização de revestimentos pulverizados por plasma. Quanto a morfologia, em um revestimento pulverizado por passagens subsequentes de um plasma cerâmico, manipulado por robôs, destacaram-se os poros globulares. Esses poros estavam distribuídos quase que homogeneamente e seu potencial para deteriorar as propriedades do revestimento é considerado proporcional a seu tamanho. Além disso, todas as categorias de tamanho de poros globulares encontrados mostraram uma perspectiva de conexão entre a identificação da estrutura e o conhecimento do comportamento do pó no plasma. Poros globulares - no caso de material e processo de pulverização estudados - surgiram como defeitos em pó parcialmente solidificado antes de impactar o substrato e como defeitos durante o espalhamento de partículas de impacto. Foram observados também poros planos inter-lamelares, e o principal problema foi a sua detecção correta na imagem segmentada por processamento digital. A distribuição espacial dos poros foi descrita usando um método baseado em distâncias em 3D e teste de aleatoriedade espacial completa. Chegaram à conclusão de que não existiam partes do espaço de revestimento contendo poros predominantemente planos e outras partes contendo poros predominantemente globulares, mas sim agrupamento de características estruturais

especiais no revestimento. Este trabalho mostrou que o uso de micro tomografia computadorizada e análise e processamento digital de imagens pode ser usado para estudo da morfologia e distribuição de poros em imagens 3D de revestimentos metálicos, entretanto a técnica só poderá ser usada se o poro for suficientemente "grande" para ser detectado pelo micro tomógrafo utilizado.

Semelhante ao presente trabalho, no estudo segundo Bengtson et al [17], o objetivo foi quantificar defeitos do tipo poros e trincas em revestimentos obtidos por aspersão térmica por arco elétrico através de técnicas de estereologia quantitativa e análise de processamento digital de imagens (PDI). Dois revestimentos distintos (condições 1 e 2) foram obtidos a partir da combinação de três arames (a, b e c). As imagens foram obtidas em modo elétrons secundários (SEI), para cada condição de revestimento e processadas com o software Image J. Como resultado foram identificadas lamelas regulares empilhadas em camadas tipo panqueca, observou-se também pontos de tonalidades mais escuras podendo ser inclusões de óxidos, poros ou segundas fases. Em ambas as condições estudadas foram observadas algumas regiões com falhas entre o substrato e o revestimento, que pode ser devido a uma preparação inadequada da superfície. De acordo com a classificação de Vreijling [3], foram verificados defeitos dos tipos 1, 2, 3, 4 e 7, incluindo a presença de redes de óxidos, partículas não fundidas, inclusões e "queimaduras" provenientes do processo de preparação metalográficas nos revestimentos de ambas as condições estudadas no trabalho citado. Essa classificação corresponde aos formatos de defeitos características, a saber: 1 = interlamelar, 2 = gás aprisionado em bolsos, 3 = bolhas de gás, 4 = entre fragmentos, 5 = entre condensados, 6 = entre dendritas, 7 = microfissuras. Os aspectos micro gráficos apresentados nas figuras 13, 14 e 15 exemplificam os defeitos e sua classificação segundo Vreijling [3].

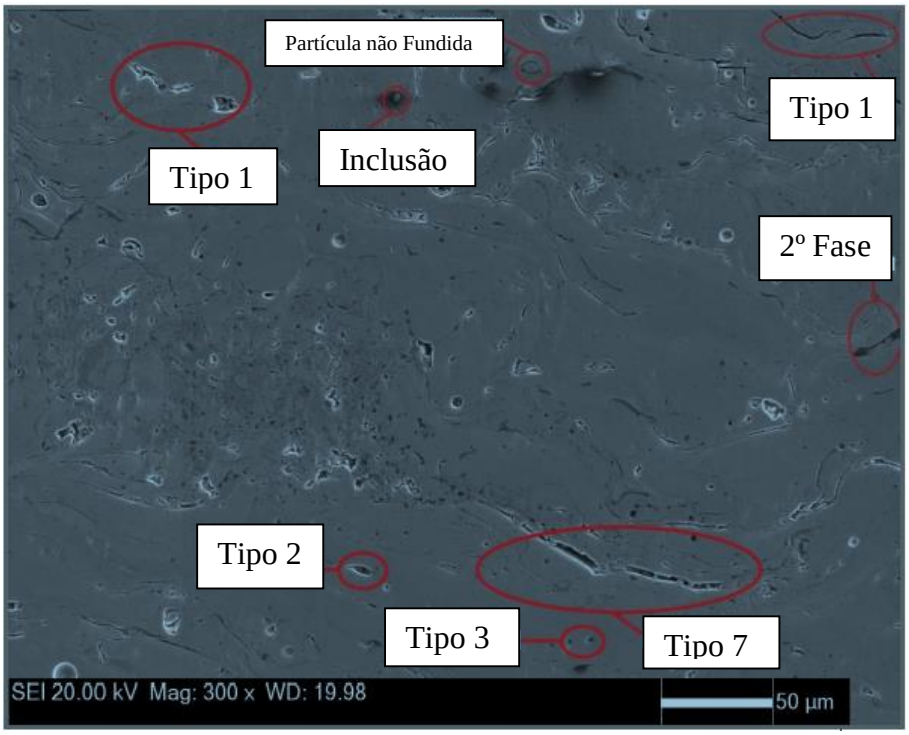


Figura 13 - Tipos de defeitos apresentados na condição 1, do trabalho de Brito [4].

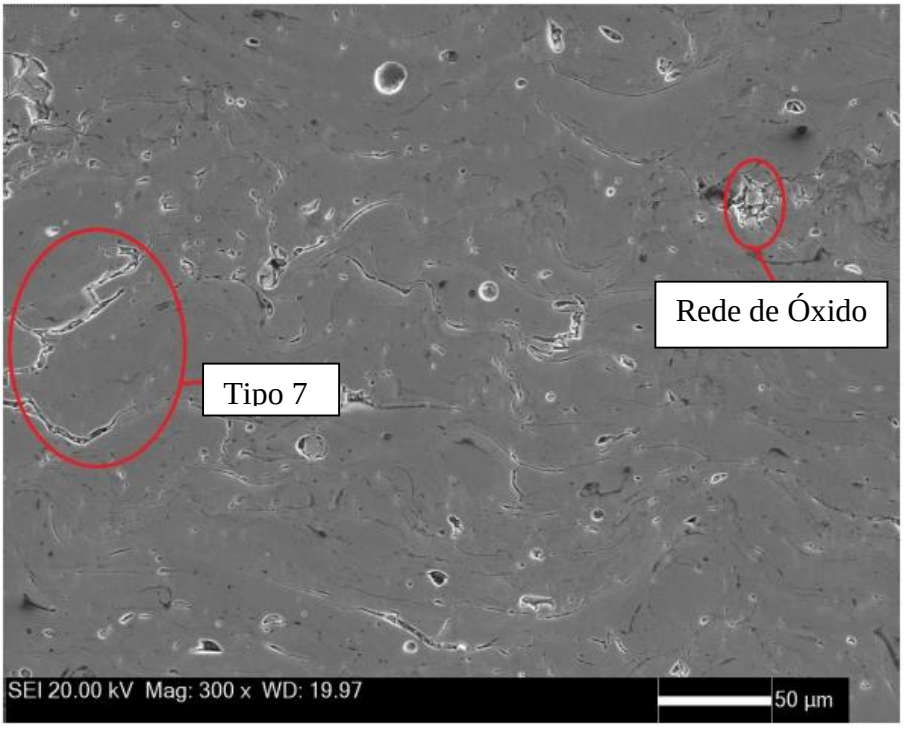


Figura 14 -Tipos de defeitos apresentados em revestimento da condição 1 com rede de óxidos, do trabalho de Bengtson et al [17].



Figura 15 -Tipos de defeitos apresentados em revestimento da condição 2, do trabalho de Bengtson et al [17].

Y Fizi et al [20] em suas pesquisas, realizaram estudo por MEV (microscopia eletrônica de varredura) para conhecer melhor o revestimento de aço inox aspergido termicamente por arco. A Figura 16 revela uma estrutura lamelar do revestimento com inclusão de partículas não fundidas ou pré-solidificados, porosidades e microfissuras também estão presentes devido ao processo de resfriamento. As camadas de óxido podem ser claramente vistas como camadas cinzas escuro. Já entre lamelas, os poros foram mostrados como manchas pretas. A fração volumétrica da porosidade do revestimento e da liga intermediária à base de Ni foi da ordem de 5 e 6%, respectivamente. Em geral, revestimentos pulverizados exibem uma quantidade significativa de partículas não fundidas e porosidades de forma não homogênia, o que pode influenciar o comportamento mecânico.

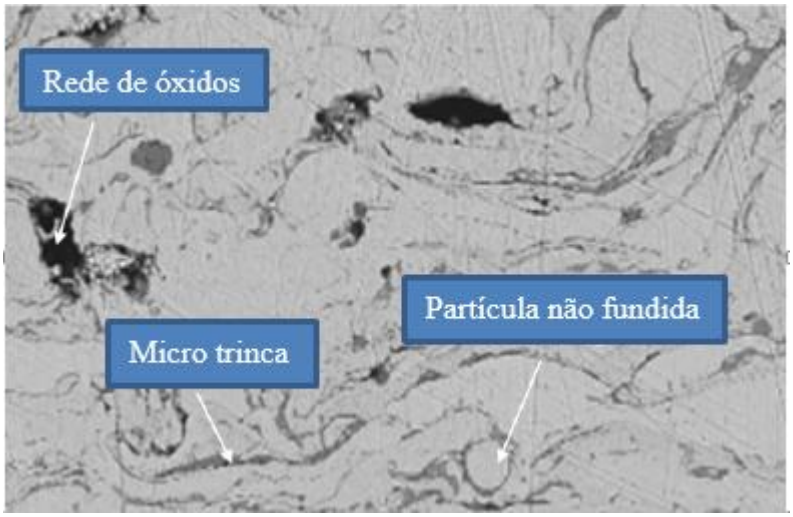


Figura 16 – MEV de revestimento aço inox aspergido termicamente por arco.
Fonte: Y Fizi et al [20].

1.12 Corrosão

Os processos de corrosão são aqueles onde ocorrem reações químicas e eletroquímicas no metal, que acontecem de forma espontânea, podendo estar associadas ou não a esforços mecânicos. A deterioração causada pela interação físico-química entre o material e o seu meio operacional representa alterações prejudiciais indesejáveis, sofridas pelo material, tais como desgaste, variações químicas, ou modificações estruturais, tornando-o inadequado para uso. Somente com o uso de mecanismos protetores é possível impedir a destruição completa de materiais metálicos, explica Gentil [21].

Segundo Roberge [22], a corrosão gera enormes e graves consequências, podendo causar a paralisação de plantas industriais, desperdício de recursos, contaminações dos produtos, redução de eficiência e superdimensionamento do projeto, pois se estima a necessidade de mais material que o necessário, devido ao valor desconhecido da velocidade de corrosão. Uma das importantes finalidades de revestimentos obtidos por aspersão térmica é serem uma proteção em relação aos mecanismos de corrosão que atacam o substrato. Assim, uma resistência à corrosão elevada em relação ao ambiente no

qual o substrato fica imerso é uma das principais finalidades de revestimentos a base de ligas metálicas.

1.13 Classificação quanto a morfologia

De acordo com Gentil e Araújo [22,23] a morfologia na qual a deterioração sobre o material ocorre é uma forma de classificar a corrosão. As principais características morfológicas são:

- **Corrosão uniforme –** Essa corrosão é caracterizada pela perda homogênea de material sobre toda superfície. Essa perda de material é similar em todos os pontos, sendo considerada a corrosão menos agressiva.
- **Corrosão em placas –** Essa corrosão consiste no desprendimento do material caracterizado pela perda do mesmo, em formato de placas. Essas placas se soltam e expõe o metal novamente ao ataque dando continuidade ao processo de corrosão. Possui dimensão maior que a corrosão por pite, porém não chega a ser uma corrosão tão grande a ponto de ser considerada uniforme.
- **Corrosão por pite ou puntiforme** – A remoção de material também ocorre de forma localizada, mas em um ponto isolado da superfície. Geralmente, inicia-se em locais com a superfície mais ativa, como inclusões ou qualquer lugar com uma película passiva diminuída. Esses pontos possuem uma profundidade bem maior que o seu diâmetro em direção ao interior do material.
- **Corrosão alveolar –** Esse tipo de corrosão localizada tem o aspecto de crateras, sulcos ou escavações. Essa corrosão também tem a característica de uma superfície arredondada no fundo da cratera e esta cratera possui, normalmente, uma profundidade menor que o seu diâmetro.
- **Corrosão intergranular –** Essa corrosão intercristalina ocorre quando o ataque se dá ao longo dos limites dos grãos (*Inter-Granular Corrosion* – IGC). Esse tipo de corrosão gera um alto número de falhas nos

equipamentos, podendo causar fraturas com tensões menores que o esperado, como a corrosão sob tensão.

- **Corrosão transgranular –** Essa corrosão transcristalina ocorre quando o ataque é no interior dos grãos cristalinos sob a forma de trinca.

A Figura 17 exemplifica alguns tipos de morfologia de corrosão.

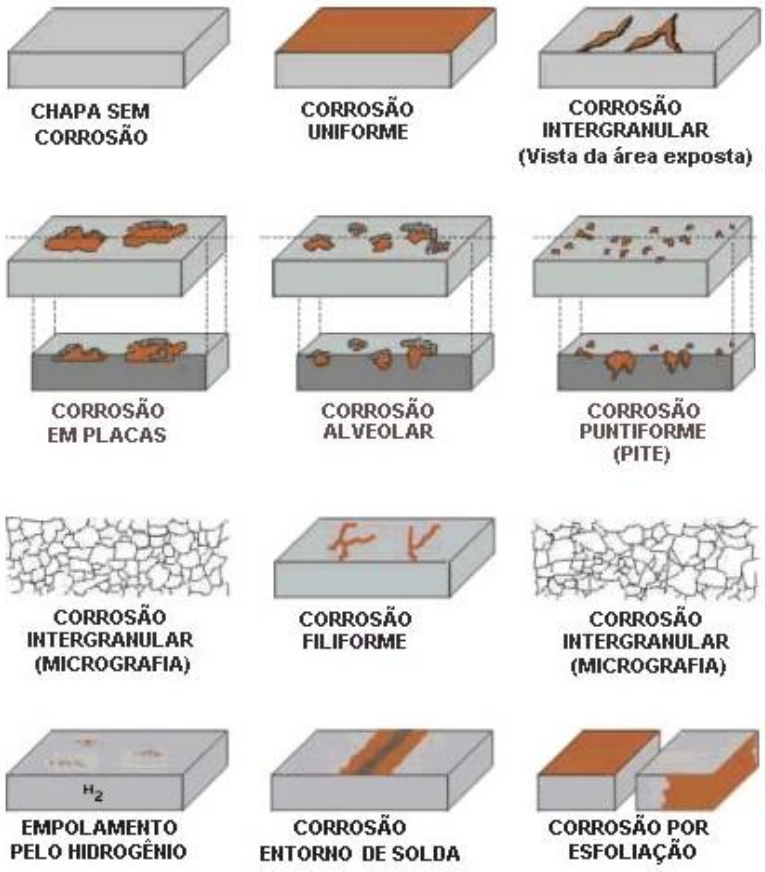


Figura 17 – Formas de corrosão- desenho esquemático. Fonte: http://www.icz.org.br/corrosao.php - acessado em 03/01/2018

1.14 Corrosão em água do mar

Sabe-se que o ramo *offshore* é de suma importância para economia do país, e que a água do mar é um ambiente corrosivo bastante complexo, por isso ressalta-se a importância de estudar meios que protejam os equipamentos submarinos. A água do mar é constituída de sais contendo matéria orgânica viva e em decomposição, lodo e também

de gases dissolvidos. Logo, a ação corrosiva da água do mar não é oriunda apenas da ação isolada do sal (NaCl), pois certamente ocorre uma ação conjunta dos diferentes constituintes. Os tipos mais frequentes de corrosão em um ambiente marinho são a uniforme, por placas e por pite ou alvéolos. Segundo Gentil [21] não são apenas as partes submersas dos equipamentos que são submetidas à corrosão de origem marinha, mas também as áreas que possuem uma submersão intermitente, pois elas também sofrem com a corrosão e isso se deve principalmente à variação das marés. Não são excluídas da ação da corrosão as áreas submetidas a respingos quando a onda se choca contra o equipamento. Essas áreas sofrem diferentes intensidades de corrosão, de acordo com as suas características. Gentil [21] explica que nas águas superficiais, há uma grande presença de luz e de oxigênio e a temperatura é elevada. A luz propicia uma maior formação de *fouling* (cracas, conchas, moluscos etc.), enquanto o oxigênio acelera ainda mais a corrosão. Já nas águas profundas, a corrosão tende a ser menos acelerada, devido a menor quantidade de oxigênio, temperaturas menores e não haver incidência de luz.

1.15 Ensaios de corrosão

Para Freitas [2], o mercado está em constante busca de soluções inovadoras para evitar a corrosão, com isso as indústrias estão sempre analisando se novos materiais atendem as suas necessidades reduzindo custos ou oferecendo maior eficiência que os já existentes. Dentro deste contexto, os ensaios de corrosão se tornaram a melhor maneira para a avaliação dessa característica.

O autor Roberge [22] define ensaios de corrosão como meios mais simples de detectar falhas e evitar o uso de materiais em condições inadequadas ou até mesmo o uso de um material mais caro do que o necessário. Explica que o ensaio de corrosão é essencial para a pesquisa de novos materiais e o desenvolvimento dos materiais já existentes, sendo muito útil no meio acadêmico. Acrescenta que os ensaios de corrosão simula o meio em que o material será submetido. Essa simulação acelera o processo de corrosão, a fim de caracterizar e avaliar os danos sofridos pelo material. Logo, os ensaios de corrosão podem ser usados no controle de qualidade como um meio adicional de garantia.

Os ensaios de corrosão são úteis também para a avaliação do material de revestimento de um certo produto. Eles podem definir se o revestimento irá satisfazer as especificações de proteção ao substrato ou não. O mesmo ensaio verifica se um processo de soldagem ou aspersão foi bem executado, pois um processo mal executado resulta em uma diluição demasiada, afetando diretamente a composição química, a microestrutura e as propriedades mecânicas do material, afirma Gentil [21].

De acordo com Gentil [21], os ensaios de corrosão são divididos em duas grandes categorias: ensaios realizados em laboratório com as condições controladas e ensaios realizados em campo ou em condições naturais de serviço. As características de cada tipo de ensaio são:

1. Ensaios de laboratórios:

Utilizam amostras do material em estudo, que será analisado em um ambiente que simula de forma mais fiel possível, o meio que irá atuar. As condições do ensaio podem ser mantidas constantes ou podem ser aceleradas, Gentil [21].

Esses ensaios em laboratório são feitos com produtos químicos, sob condições rigorosamente controladas. Cada ensaio deve ser reproduzido com uma duração necessária para que o fenômeno possua um regime estacionário, não sendo nem muito rápido, nem muito lento. Se as condições nos ensaios de corrosão puderem reproduzir as condições de operação, entende-se que os resultados serão fiéis. Apesar de alguns aspectos não serem reproduzidos por possuírem características de difícil reprodução, como *fouling* e o *biofouling*, ainda assim, os resultados são próximos dos reais, Gentil [21].

O autor enfatiza que esses ensaios de laboratório fornecem uma previsão do que pode acontecer na prática. No entanto, o tempo necessário para que essa previsão ocorra de forma correta depende da forma como foi produzido o ensaio e fim pelo qual o mesmo foi requerido. Ensaios de corrosão em laboratório são realizados em tempos que variam de alguns minutos ou até mais de um ano, explica Gentil [21].

2. Ensaios de campo:

Além de possuir as mesmas finalidades de um ensaio de laboratório, o ensaio de corrosão de campo permite monitorar de forma constante a corrosão do equipamento em operação, pois este ensaio tem capacidade de analisar o equipamento como um todo e não somente a amostra. Esses ensaios ajudam significativamente no planejamento da manutenção do equipamento, reduzindo os custos e minimizando a possibilidade de paralisação da produção de forma inesperada. Esse tipo de ensaio é muito eficiente para estimar a vida-útil do equipamento, principalmente pela proximidade das condições de operação, explica Gentil [21].

1.16 Ensaio de dureza

Segundo Garcia [24], o ensaio de dureza consiste na aplicação de uma carga na superfície do material empregando um penetrador padronizado, produzindo uma marca superficial ou impressão. A medida da dureza do material ou da dureza superficial é dada como função das características da marca de impressão e da carga aplicada em cada tipo de ensaio realizado. Esse ensaio é amplamente utilizado na indústria de componentes mecânicos e elétricos, tratamentos superficiais, vidros e laminados, devido vantagem de fornecer dados quantitativos das características de resistência de deformação permanente das peças produzidas. É utilizado como um ensaio para o controle das especificações da entrada de matéria-prima e durante as etapas de fabricação de componentes, e em alguns casos em produtos finais. Desenvolvido inicialmente para os materiais metálicos, atualmente encontra vasta aplicação também para materiais poliméricos, cerâmicos, semicondutores e filmes finos. Cabe ressaltar que os resultados de dureza podem variar em função de tratamentos aplicados ao material (tratamentos térmicos, tratamentos termoquímicos, mecânicos, refusão a laser, etc.), temperatura e condições da superfície.

Brito [4] em seu trabalho, sobre aspersão térmica de metal em aço de baixo carbono, baseou-se no método usado pela Petrobras e indústrias da área de revestimento para ensaio de dureza, que consiste em fazer 3 tipos de análises: microdureza em regiões sem defeitos ao longo do revestimento (apenas estrutura lamelar), microdureza em regiões com ou sem defeitos ao longo do revestimento (regiões aleatórias) e microdureza

em regiões aleatórias desde a superfície do revestimento até o substrato (passando pela liga intermediária de aderência).

Na Figura 18, pode-se observar exemplo de identação em ensaio de microdureza para o último tipo de análise por Brito[4].

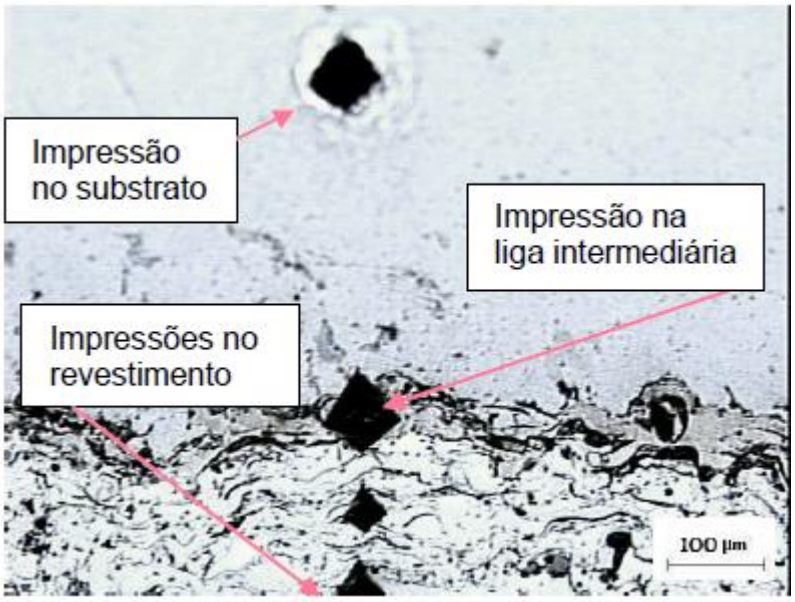


Figura 18 – Microdureza seguindo do substrato até o revestimento [4].

A Tabela 1 a seguir mostra os valores obtidos nos ensaios de microdureza para cada condição estudada.

Tabela 1 – Valores de microdureza (HV). Fonte: Brito[4].

Tipo de medição de dureza (HV)	Cond. 1	Cond. 3	Cond. 4	Cond. 5
Grãos aleatórios	476,9	307,3	250,9	279,6
Grãos sem defeitos	524,4	296,0	242,0	250,0
Camada do revestimento	427,2	308,1	280,4	264,5

O autor faz um estudo sobre os componentes e conclui que a presença de boro e ferro é eficiente para componentes que exigem alto grau de resistência a corrosão. Indica que fases duras (normalmente boretos) são formados durante a solificação do material, aumentando a dureza e resistência ao desgaste do revestimento. O cromo aumenta a resistência a oxidação e corrosão de altas temperaturas e aumenta a dureza dos

revestimentos formando precipitados muito duros. O boro reduz o ponto a temperatura de fusão e ajuda na formação de fases duras.O silício é adicionado ao revestimento para elevar propriedades de fluência da liga e o carbono produz carbonetos com altos níveis de dureza que aumenta a resistência. Observa-se também que inclusões de óxido aumentam a dureza do revestimento. Brito[4].

Y Fizi et al [20] realizaram caracterização microestrutural de um substrato de baixo aço carbono com revestimento de aço inoxidável AISI 420 e os valores de microdureza que foram tomados ao longo da seção transversal da amostra seguindo do substrato para o revestimento, foi aumentando regularmente. Logo, o valor médio da microdureza de revestimento de aço inoxidável é significativamente maior do que a do substrato, propiciando boa resistência a corrosão e ao desgaste. Sabe-se que a presença de cromo teve um papel importante no endurecimento do revestimento devido ao seu efeito de endurecimento moderado. Além disso, para o conteúdo de cromo, algumas não-integridades como porosidade, óxidos e partículas não fundidas induzem uma alteração nos valores de dureza do revestimento. Para o cálculo de microdureza foi realizado a média de dez medidas. A microdureza para a amostra revestida e depois recozida foi da ordem de 174HV0,5 e 160HV0,5, respectivamente. Pode-se notar que quando a carga de teste do identador é aumentada (2 a 5N), a microdureza diminui devido a elasticidade de recuperação e ao crescente efeito de microfissuras nas camadas de revestimento.

A Figura 19 mostra a micrografia do revestimento de aço inox AISI 420, aspergido termicamente por arco, antes e depois do tratamento térmico.

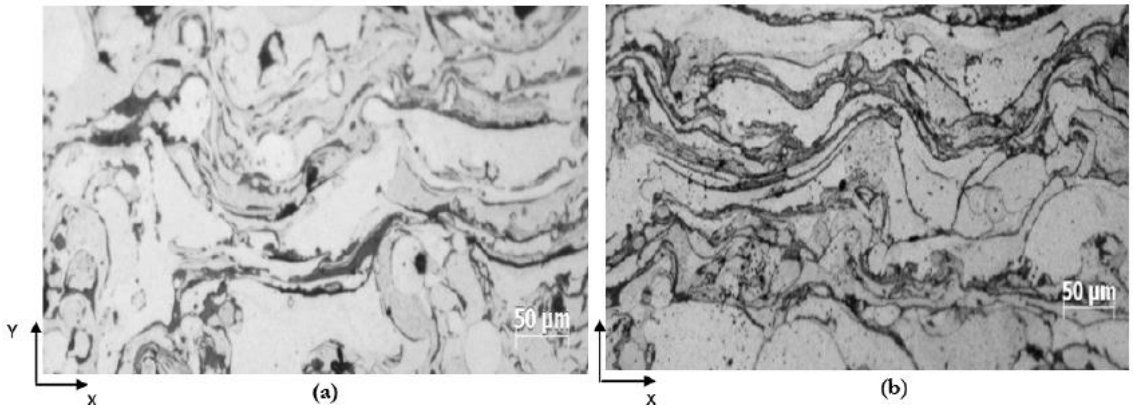


Figura 19 – Micrografias: (a) sem tratamento térmico; (b) depois do tratamento.
Fonte: Y Fizi et al [20].

2.0 Materiais e Métodos

2.1 Materiais

A aspersão térmica foi realizada por uma empresa de manutenção mecânica especializada. A mesma preparou as amostras e disponibilizou os dados técnicos.

Neste trabalho foram utilizadas quatro ligas distintas na composição dos arames usados na aspersão (arames a, b, c e d). A Tabela 2 apresenta a composição dos quatro arames usados.

Tabela 2 - Elementos químicos encontrados nos quatro arames usados na aspersão

(% Teor nominal máximo em peso).

Arame	*Fe*	*Co*	*Cr*	*Ni*	*B*	*Mn*	*W*	*Mo*	*C*	*Si*	*Cu*	*P*	*N*	*Nb*
a	*66,1*		*27,0*		*3,5*	*1,8*				*1,6*				
b	*65,7*		*25,7*	*2,9*		*1,9*		*0,8*	*1,6*	*1.4*				
c	*3,6*	*58,4*	*28,8*	*1,9*		*0,9*	*4,9*	*0,02*	*1,1*	*0,3*				
d	*68,5*		*19,6*	*9,1*		*1,5*		*0,5*	*0,02*	*0,3*	*0,4*	*0,03*	*0,07*	*0,01*

Fonte: fabricante

As composições químicas dos arames foram escolhidas para a obtenção de revestimentos com melhor resistência a corrosão e elevadas durezas, de acordo com o fabricante, não sendo autorizado a divulgação do nome comercial da liga.

A Tabela 3 apresenta as 4 combinações (nomeadas como 1, 3, 4 e 5) entre os arames listados na Tabela 1. A amostra de número 2 não é objeto de estudo desta pesquisa. A numeração das amostras foi preservada para que seja possível comparar com o trabalho do autor Brito, feito em 2010 com as mesmas amostras e com futuros trabalhos.

Tabela 3 – Condição gerada pela combinação de arames para obtenção do revestimento.

Condição	Combinação dos arames
Liga 1	a+b
Liga 3	b+c
Liga 4	c+d
Liga 5	b+d

Fonte: Empresa

2.2 Preparação da amostra

Para cada condição de revestimento foi separado 1 chapa de substrato de aço carbono UNS G10200 com as dimensões 100mm x 150mm x 4,5mm. Estas passaram por processo de limpeza mecânica grau Sa 2^(1/2), conforme norma sueca SIS-05 5900/1967, por jateamento abrasivo com óxido de alumínio G.20, antes de serem revestidas.

As deposições de revestimentos aplicadas pela técnica de arco elétrico foram feitas em apenas uma face de cada chapa com a espessura pré-definida de 1,9 mm. A descrição deste processo foi realizada conforme seção (ASP) - Arc Spray Process – Arco Elétrico do item 1.8 da Revisão Bibliográfica deste trabalho. A tensão aplicada foi de 40V, enquanto que a corrente ficou próxima de 100 A, a taxa de deposição foi de 3,24 kg/h, o ângulo de posição da pistola com 90º em relação a chapa e utilizou-se gás de proteção 100% argônio. A escolha destes parâmetros foi feita a partir de experimentos anteriores que indicaram ser esta a melhor combinação para os tipos de revestimentos estudados, além de estarem de acordo com a literatura técnica R.A. MAHESH et al [25]. O equipamento possui duas entradas para os carretéis de arames a serem depositados, estes com diâmetro de 2,6 mm.

A partir destas chapas revestidas foi cortada uma pequena amostra de cada condição com discos de dureza superior a 45HRc, e em seguida embutidas a quente em resina de baquelite, de forma que fique exposto a espessura do substrato e do revestimento. Estes procedimentos realizaram-se no laboratório de Metalografia do CEFET/RJ. O baquelite utilizado foi o Polyfast da marca Struers e o equipamento foi uma

embutidora PRE-30 da marca Arotec. Para este embutimento, a embutidora aqueceu a amostra e o Polyfast foi mantido a uma pressão de 150kgf/cm² durante oito minutos para o aquecimento e mais oito minutos para o resfriamento, para que o baquelite endurecesse. O próximo passo foi a preparação metalográfica das amostras, que foram lixadas e polidas até obtenção de superfícies especulares.

As amostras embutidas foram lixadas com lixas metalográficas na sequência granulométrica: 100, 220, 320, 400, 600. Em seguida, foi realizado polimento abrasivo de pasta de diamante na sequência granulométrica de 6μm, 3μm e 1μm. Ambas atividades foram realizadas numa politriz universal modelo Aropol2V, no laboratório LAMAT no CEFET/RJ.

Quando as amostras eram trocadas de uma lixa para outra, eram giradas em 90 graus e lixadas novamente repetindo o mesmo processo até o fim do uso da última lixa, devendo as amostras estarem limpas, sem arranhões e sem planos desnivelados.

Para melhor preparo da superfície finalizou-se com o polimento, no qual foi utilizado um lubrificante (álcool com glicerina) no início do polimento e álcool para o resfriamento das amostras enquanto eram polidas. Na troca do primeiro polimento para o segundo a amostra foi girada em 90º, e no último polimento girou-se em todos os sentidos, de forma a garantir uma superfície perfeita para análise em microscópio.

A Figura 20 apresenta as amostras que foram utilizadas neste estudo, enumeradas conforme a condição da Tabela 2.



Figura 20 – Amostras sequencialmente da esquerda para direita nas condições:1,3,4 e 5 conforme Tabela 2. Fonte: Própria autora.

2.3 Microscopia Ótica (MO)

As amostras foram analisadas no microscópio óptico Olympus BX60M disponível no LAMAT do CEFET/RJ e foram capturadas 10 imagens para cada condição de revestimento em magnificações de 100x, 200x e 500x. As imagens com aumento de 500x foram as utilizadas para as etapas de análise e processamento digital (PDI). As imagens foram capturadas tentando-se manter sempre as mesmas condições de iluminação, para cada tipo de magnificação. Foi realizado um estudo dos defeitos característicos nestas imagens através do *software* FIJI Image, que será melhor descrito adiante.

2.4 Microdureza Vickers (HV)

A dureza do revestimento foi obtida utilizando um Microdurômetro Pantec, modelo MV1000A, do laboratório de materiais da UERJ. A carga aplicada foi de 300 gf (0.3HV), no tempo de 10 segundos. Foram selecionados 8 pontos randômicos em diferentes regiões dos revestimentos testados para medidas de dureza Vickers (HV).

A importância das amostras que são pequenas estarem em baquelite, se dá para facilitar que as mesmas se posicionem perpendicular ao penetrador do Microdurômetro, para que não danifiquem o aparelho e para que não tenha erro nas medições.

2.5 Processamento digital da imagem (PDI)

A etapa de processamento e análise digital de imagens (PADI) ou de processamento digital de imagens (PDI) foi realizada usando-se o *software* FIJI Image (https://imagej.net/Fiji/Downloads). Nesta etapa foram realizados procedimentos para a identificação e quantificação do percentual de poros, trincas e redes de óxidos nas imagens obtidas por MO em regiões selecionadas das superfícies preparadas das amostras, isto é, imagens de regiões sem superposição de outras regiões ou campos de análise (sem sobreposição de defeitos).

Para esta etapa foram utilizadas imagens com aumento de 500x obtidas por microscopia óptica (dez imagens para cada condição de revestimento).

Segue-se um passo a passo usado para o processamento de uma única imagem e que exemplifica as principais etapas para o processamento aplicado para todas as imagens.

- Pré-processamento – Consiste na adequação da imagem para a extração de atributos. São etapas de ajuste de contraste, brilho e redução de ruídos (se existirem). As Figuras 21 a 26 exemplificam as operações principais de pré-processamento realizadas neste trabalho.

  Passo a passo:

  I. File>Open (abre a imagem a ser estudada);
  II. Seleciona-se somente a imagem, excluindo a indicação da escala com o retângulo de seleção.
  III. Image>Crop (recorta a área selecionada)
  IV. Image>Type>8-bit (esse passo é primordial para escala de cinza adequada);
  V. Image>Duplicate (essencial para comparação da imagem editada com a original);
  VI. Image>Adjust>Brightness/Contrast (Torna-se nítidos os pontos de interesse, trabalhando contrastes de tons mais claros e mais escuros);

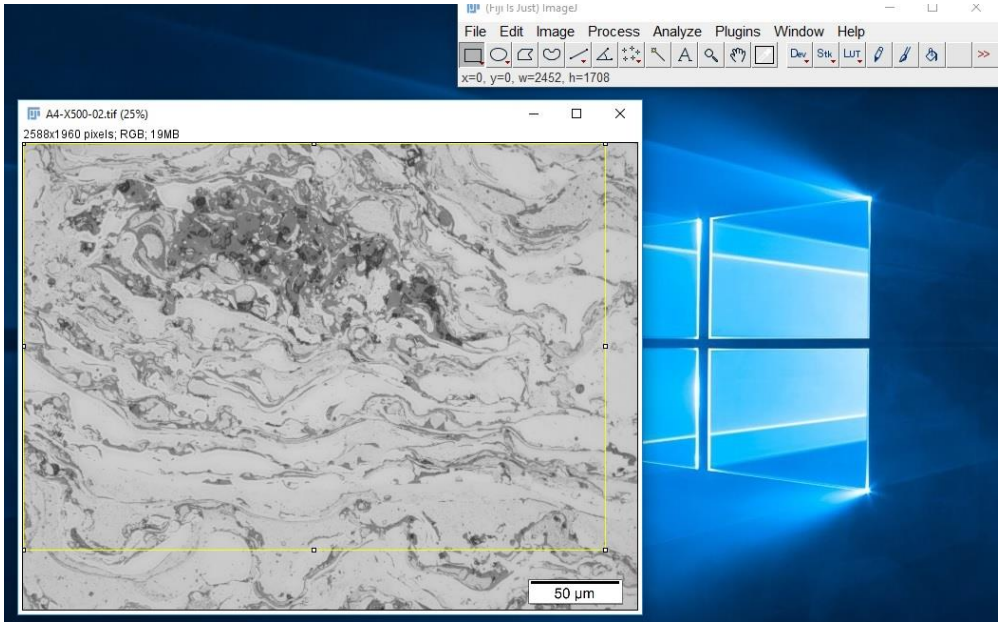


Figura 21 – Selecionando área de interesse. Fonte: Própria autora.

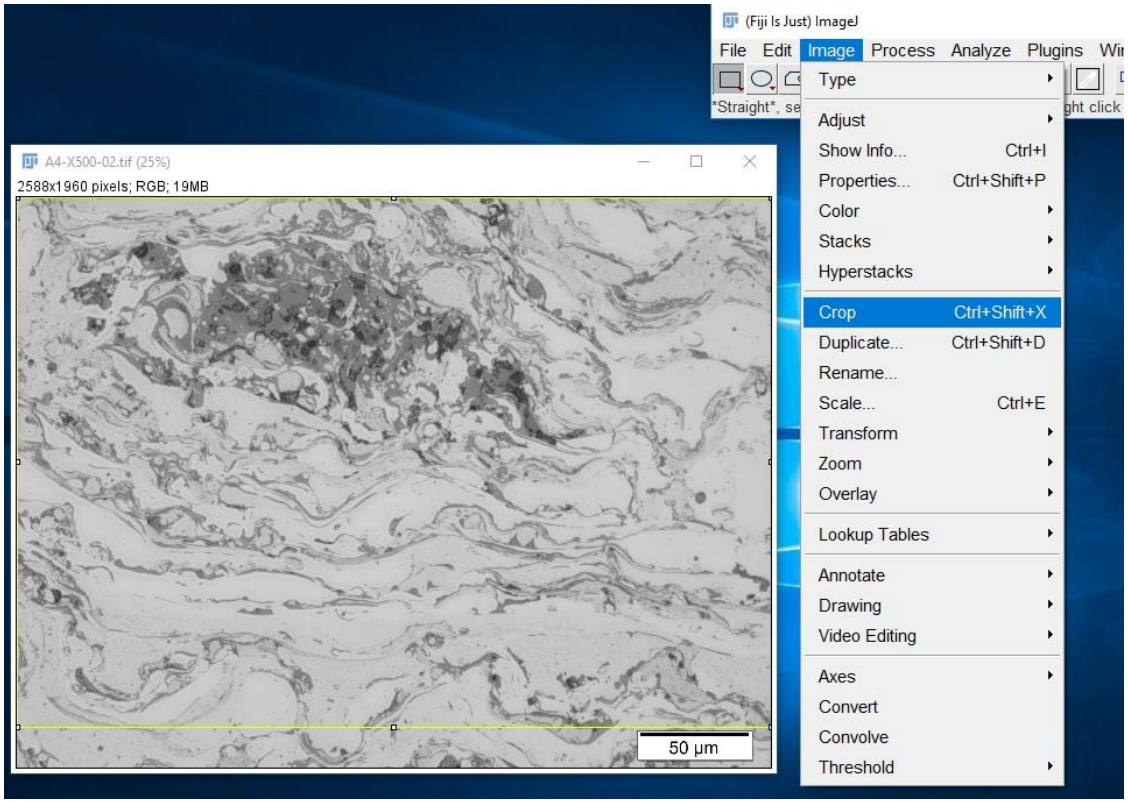


Figura 22 – Ferramenta Crop. Fonte: Própria autora.

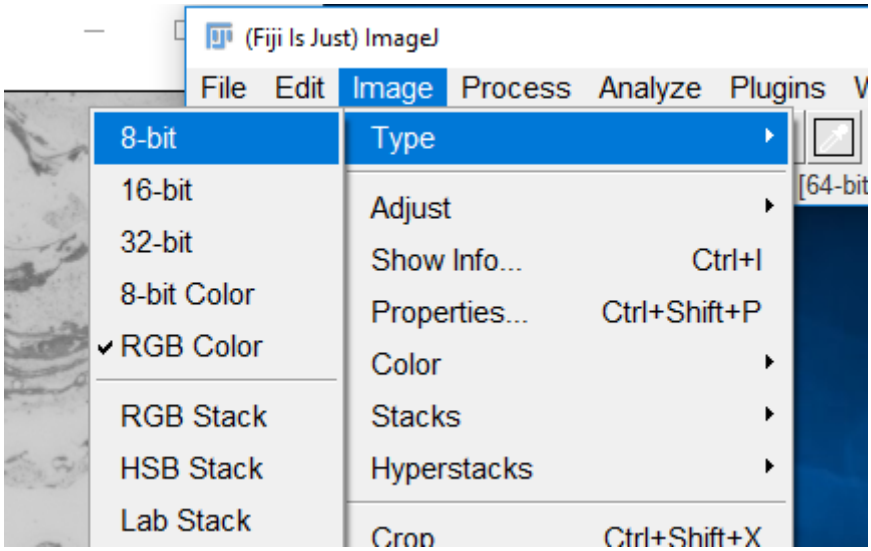


Figura 23 – Adequação da escala. Fonte: Própria autora.

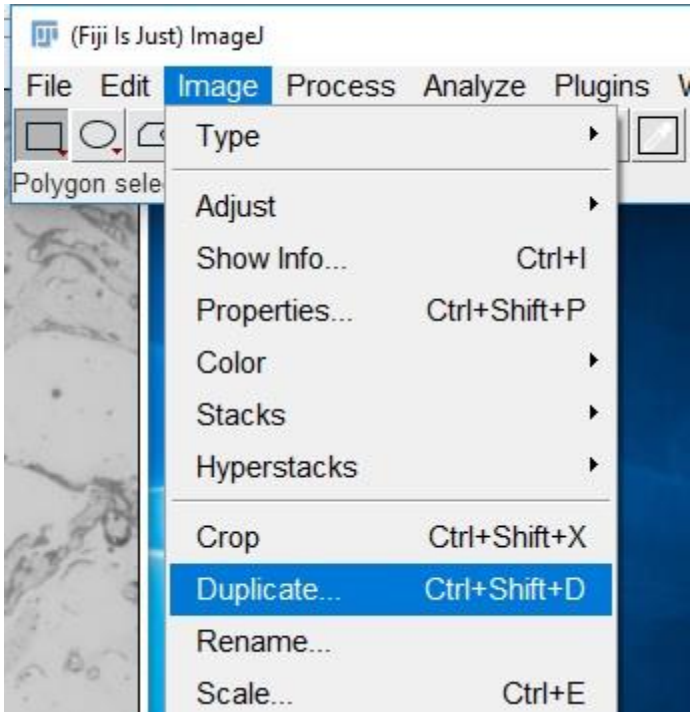


Figura 24 – Duplicando imagem para comparação. Fonte: Própria autora.

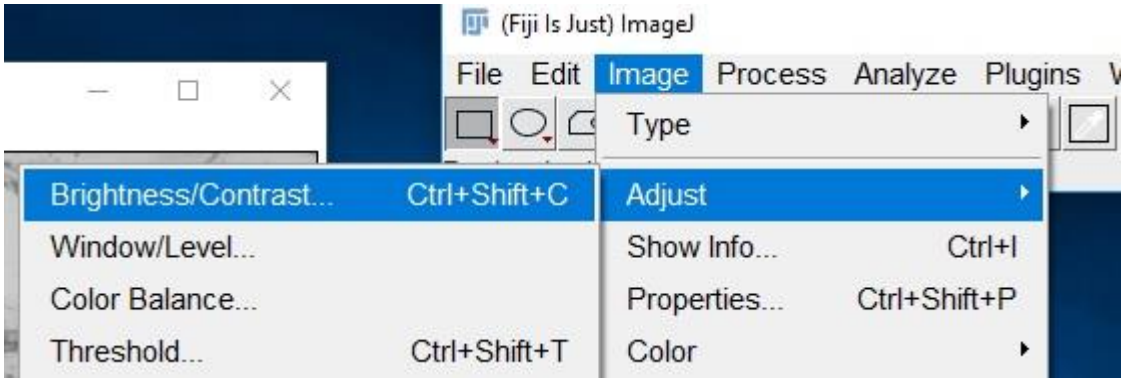


Figura 25 – Realçando pontos de interesse. Fonte: Própria autora.

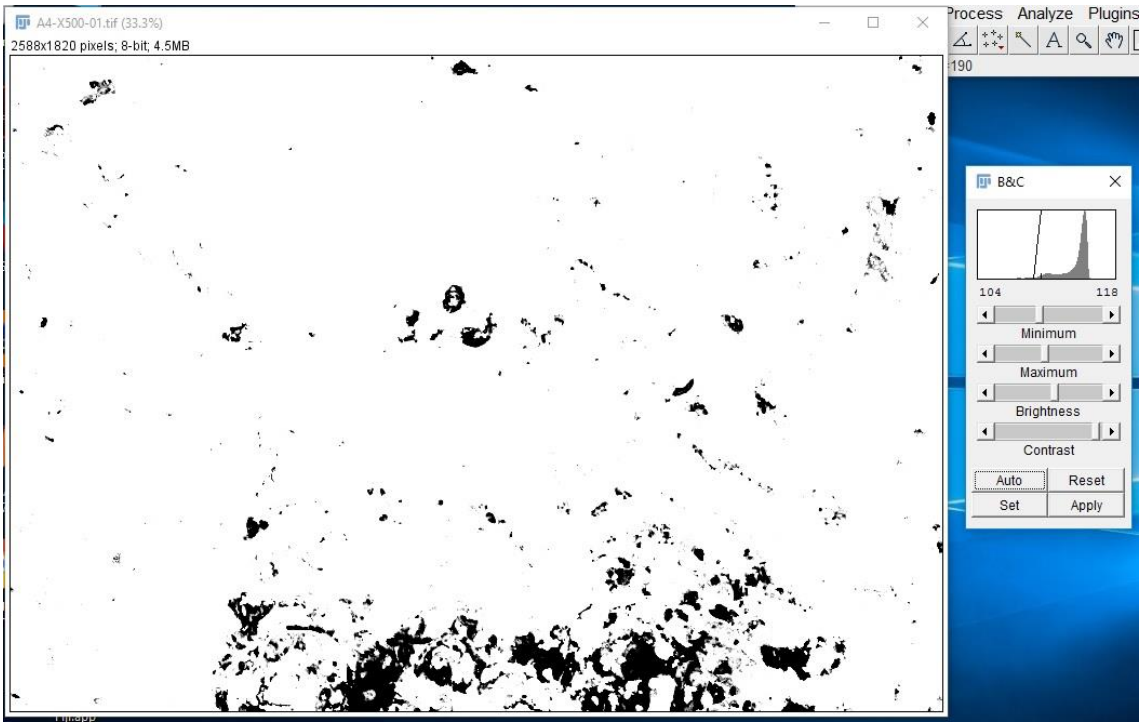


Figura 26 - O resultado. (Imagem já realçada após ajustes nos valores de máximo e mínimo do histograma no canto direito). Fonte: Própria autora.

- Segmentação – Consiste segmentar na imagem através da diferença dos níveis de cinza os defeitos de interesse a serem quantificados (poros, fases, rede de óxidos, inclusões, trincas, etc.). Os parâmetros de segmentação utilizados foram os já pré-determinados pelo software. As Figuras 27 e 28 apresentam estas operações sobre a imagem exemplo.

Passo a passo:

I. Image>Adjust>Threshold (forma-se uma imagem binária, onde o programa entende apenas as cores branca e preta);

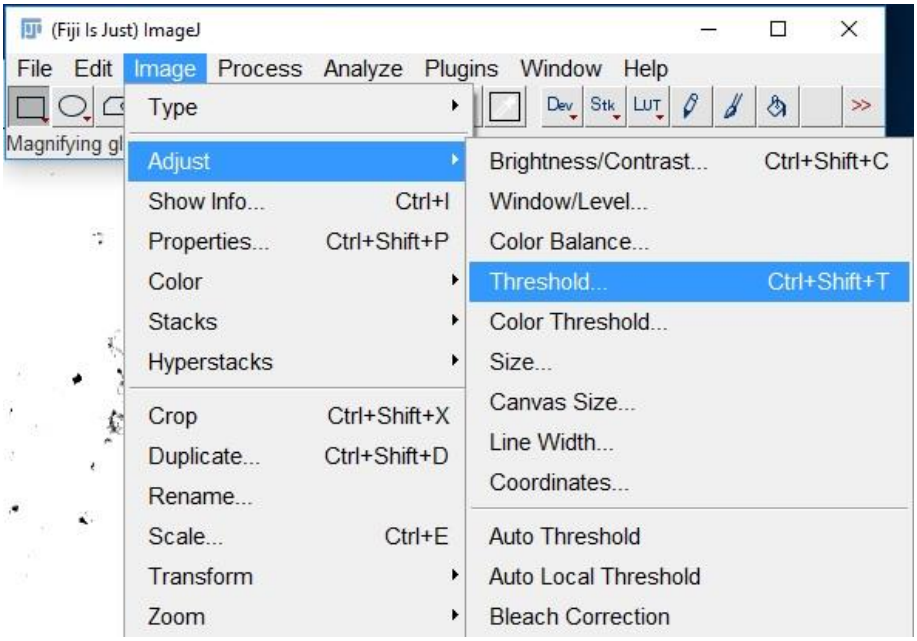


Figura 27 – Ferramenta Threshold. Fonte: Própria autora.

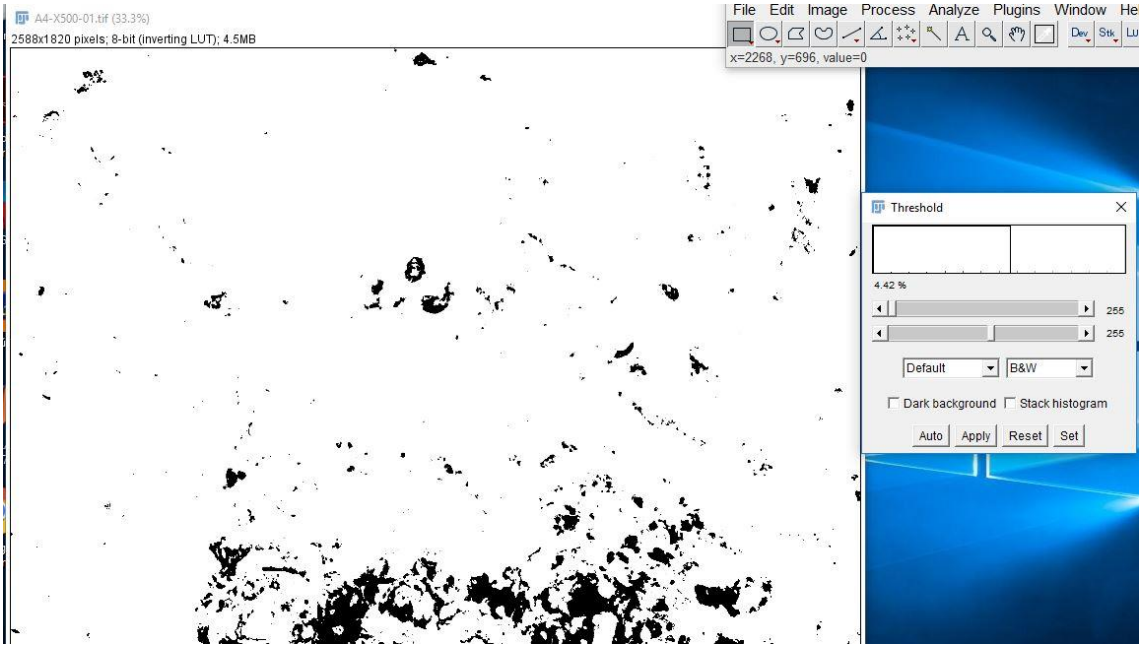


Figura 28 – Resultado de imagem binária. Fonte: Própria autora.

- Pós-processamento – Nesta etapa são eliminados os ruídos, isto é, regiões que foram segmentadas e não deveriam ter sido. As Figuras 29 a 31 exemplificam as operações de pós-processamento.

  Passo a passo:

  I. Process>Binary>Open (erosão seguido de dilatação dos pixels isolados);
  II. Process>Noise>Remove Outliers (preserva-se razoavelmente a forma dos objetos de interesse);

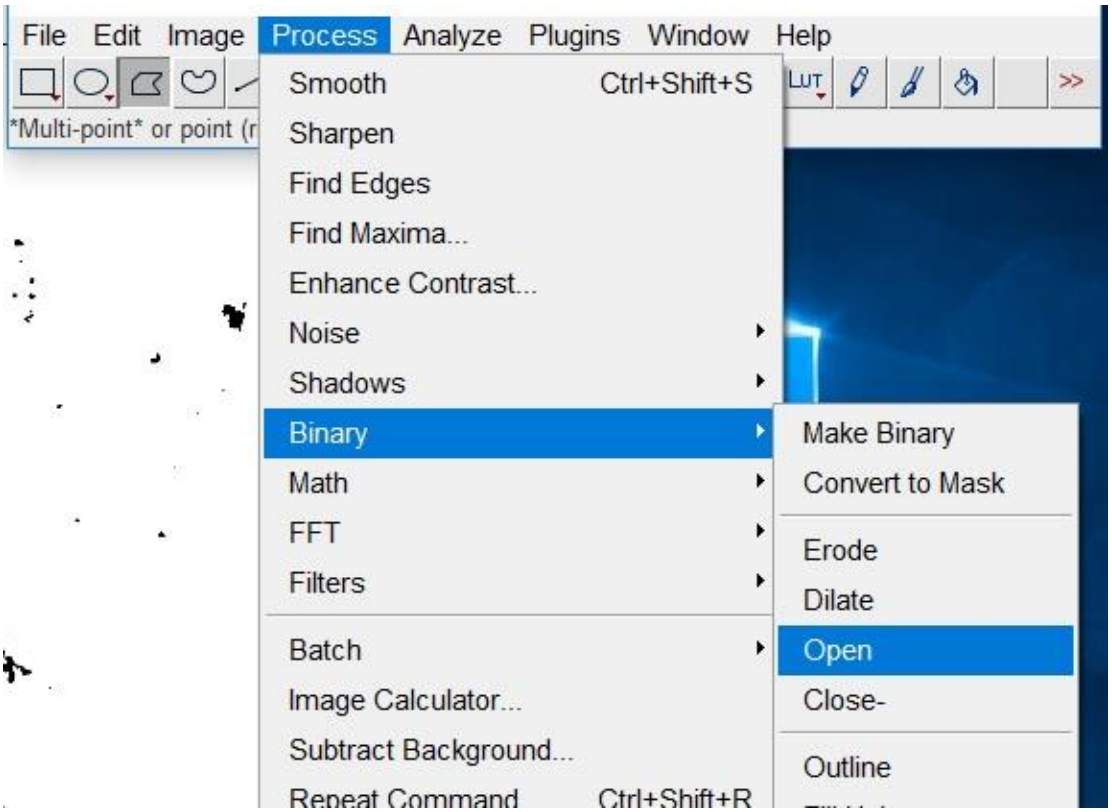


Figura 29 – Ferramenta Binary- Open. Fonte: Própria autora.

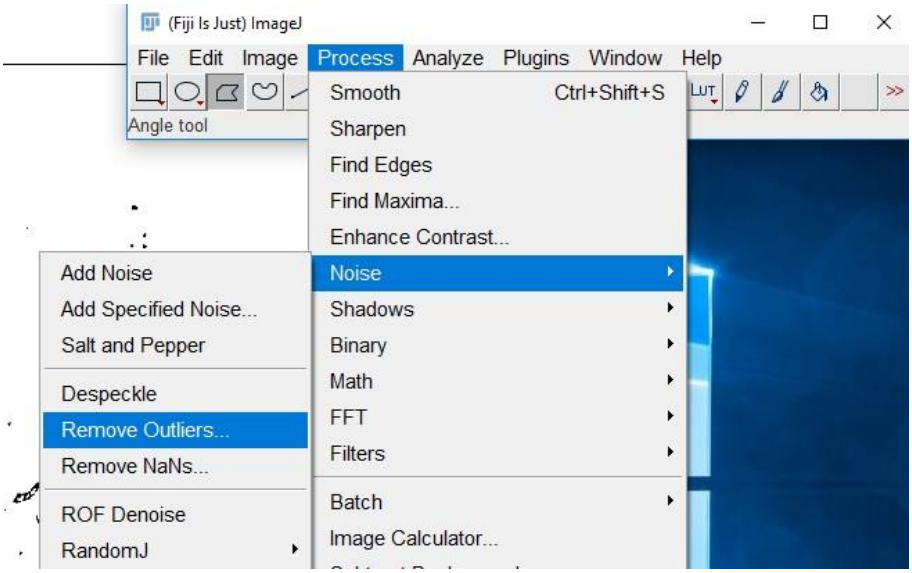


Figura 30 – Ferramenta Noise- Remove Outliers. Fonte Própria autora.



Figura 31 – Resultado da imagem. Fonte: Própria autora.

- Análise das partículas – Nesta etapa é feita a quantificação dos pixels segmentados gerando-se um resultado de percentual de defeitos por área avaliada. As Figuras 32 a 36 exemplificam as etapas para a quantificação de objetos de interesse na imagem.

Passo a passo:

I. Analyze>Analyze Particles (dentre outras informações, fornece a (%) da área de elementos segmentados).
II. Seleção dos itens de interesse (ver figura 33).
III. Telas de resultados.
IV. Desmarcar o item Label para uma imagem mais limpa dos defeitos.
V. Quadro de resultado com porcentagem de defeitos por área.

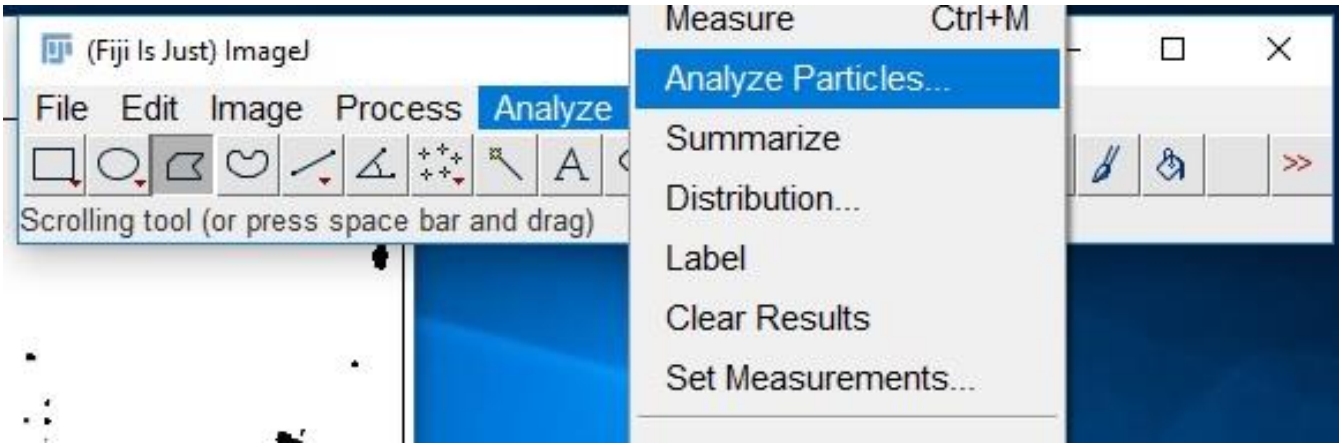


Figura 32 – Ferramenta Analyze Particles. Fonte: Própria autora.

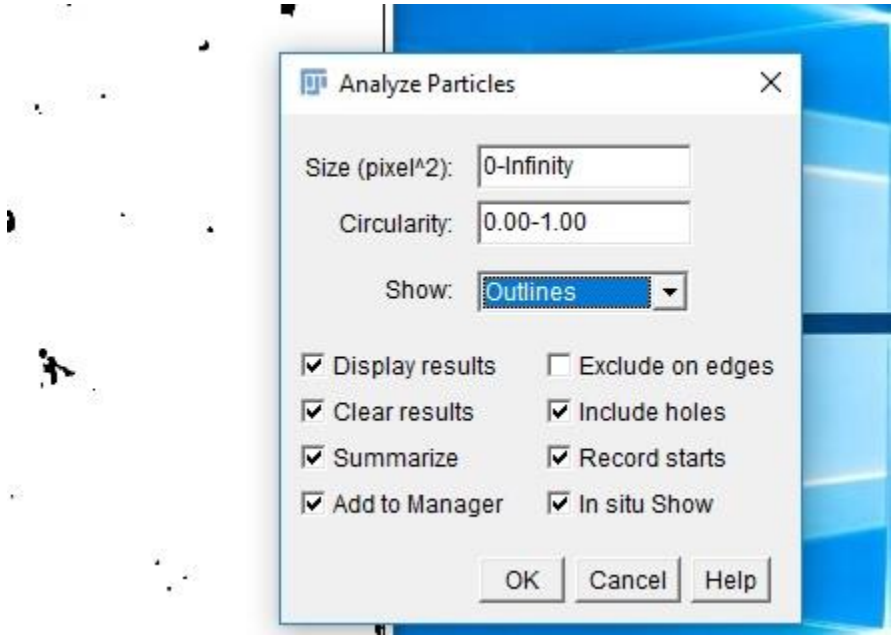


Figura 33 – Seleção de itens de interesse. Fonte: Própria autora.

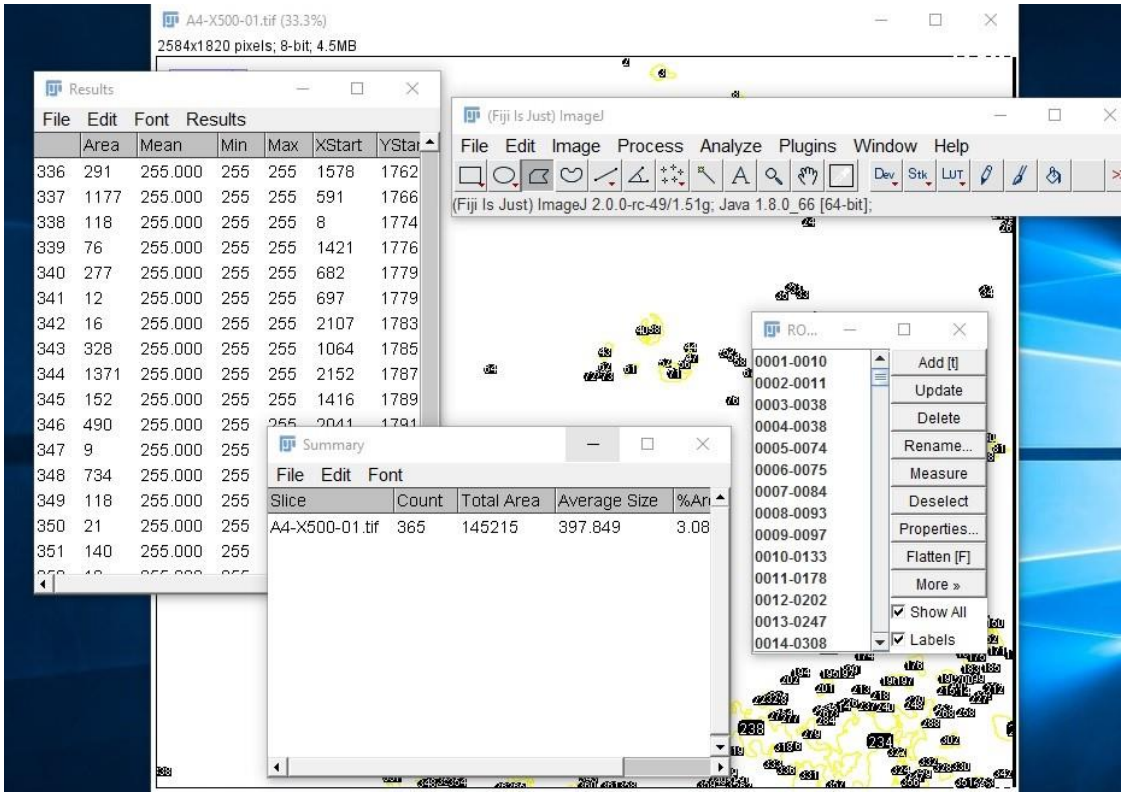


Figura 34 – Telas de resultados. Fonte: Própria autora.

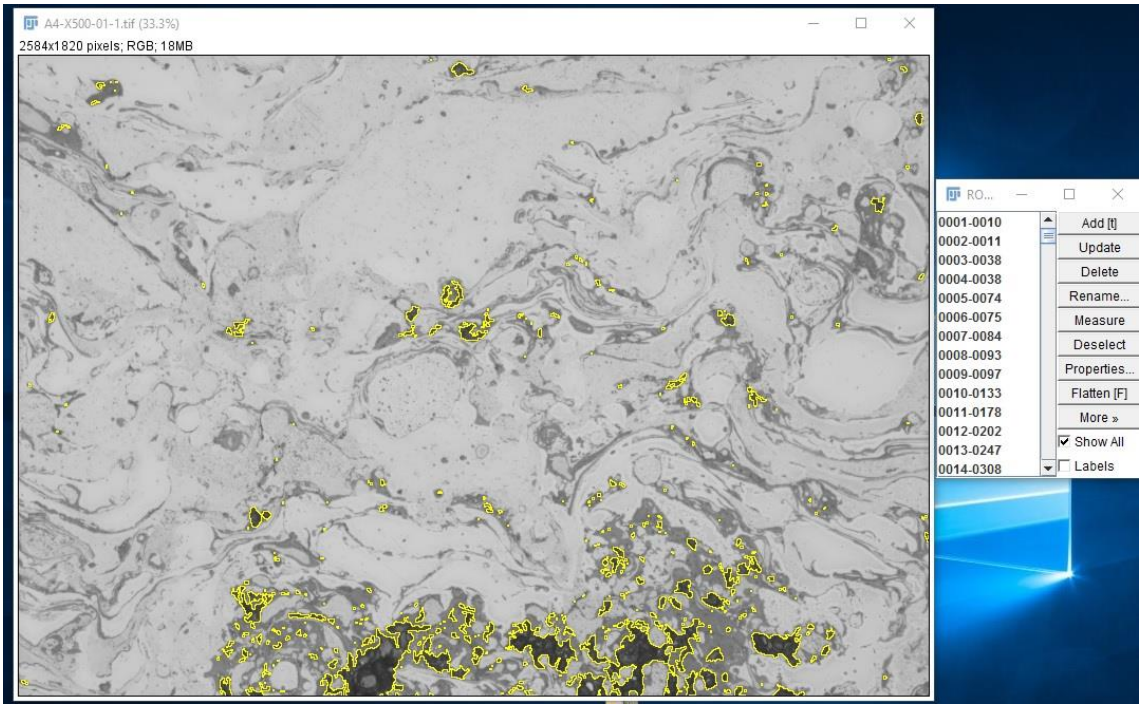


Figura 35 – Imagem Final com defeitos em destaque. Fonte: Própria autora.

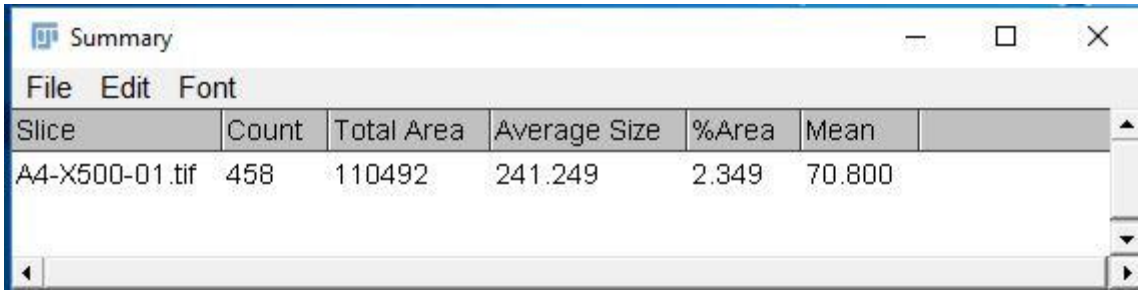


Figura 36 – Resultado da análise pelo *Software* FIJI Image J – Fonte: própria autora.

As Figuras 37 e 38 mostram mais um exemplo do processamento digital de imagem de uma outra amostra analisada nesta pesquisa.

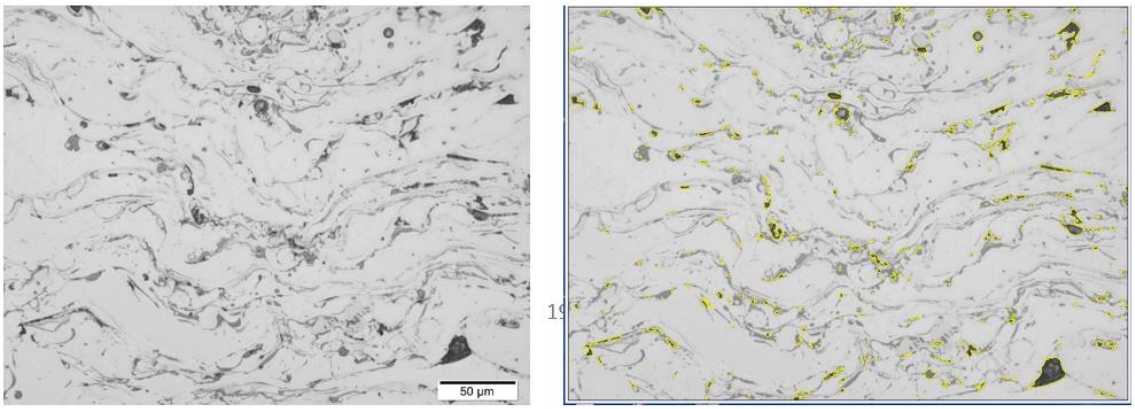


Figura 37 – imagem original (esq.), imagem tratada com defeitos selecionados (dir.) – Fonte: própria autora

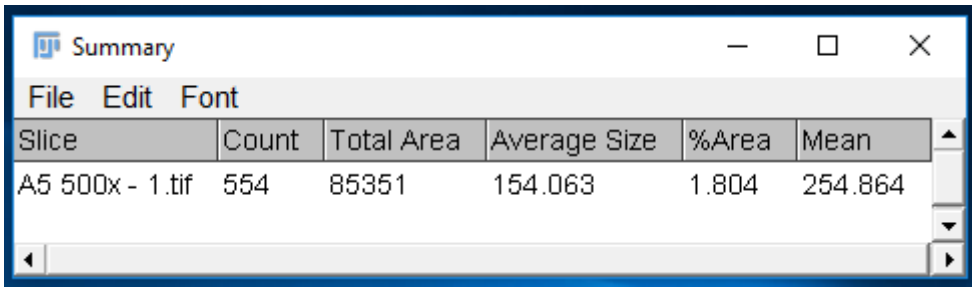


Figura 38 – Resultado da análise da imagem da Figura 37 obtido pelo *Software* FIJI Image J – Fonte: própria autora

2.6 Ensaio de Corrosão

O ensaio foi realizado no laboratório da UERJ. Para dar início ao ensaio, primeiro as amostras foram limpas com banho de ultrassom a temperatura ambiente por 30 min e depois submersas a água corrente e esfregadas com escovas de cerdas de polímeros. Em seguida, as amostras permaneceram na estufa modelo EDG 3P-S a 100ºC por 20 minutos. Para avaliar a perda de massa, as amostras foram pesadas em uma balança de precisão de 0,0001g, marca Marte, modelo AY220 e os valores registrados.

Para o ataque químico, preparou-se uma solução com a proporção de 1 medida de Percloreto de Ferro em solução (38% $FeCl^3$) para 5 medidas de água destilada. Esta proporção foi de acordo com a norma ASTM-G48 para aços inoxidáveis. Em cada um dos recipientes, contendo 600 ml da solução foi depositado uma das amostras, que permaneceram nesse processo de ensaio de corrosão a temperatura ambiente por 72 horas. Essa etapa é mostrada na Figura 39. Feito isso, as amostras foram submetidas a um novo processo de limpeza, igual ao anterior, levadas a estufa e novamente pesadas. As massas

das amostras antes e após o ensaio de corrosão foram comparadas. E obteve-se um resultado qualitativo, observando-se o aspecto das amostras.

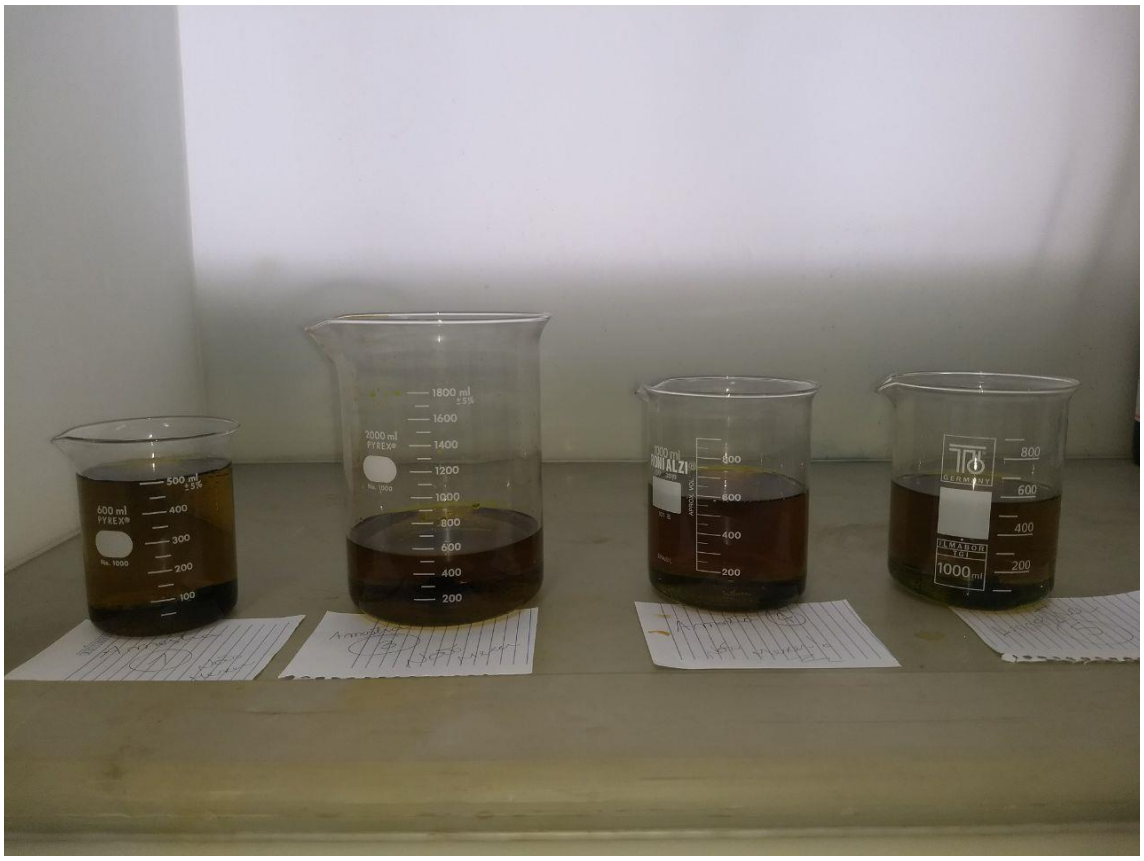


Figura 39 – Amostras em solução após 72 horas. Fonte: Própria autora.

Nota-se que houve uma redução no volume de cada recipiente, pois ocorre volatização de uma boa parte do reagente inicial.

3.0 Resultados e discussões

3.1 Microscopia óptica

Foram geradas imagens através de microscopia óptica (MO) para que fosse possível analisar e quantificar a presença de defeitos como poros, redes de óxidos e trincas na camada dos revestimentos, por meio de técnicas de análise e processamento digital de imagens.

As Figuras 40 a 43 exemplificam com uma imagem de cada condição estudada.

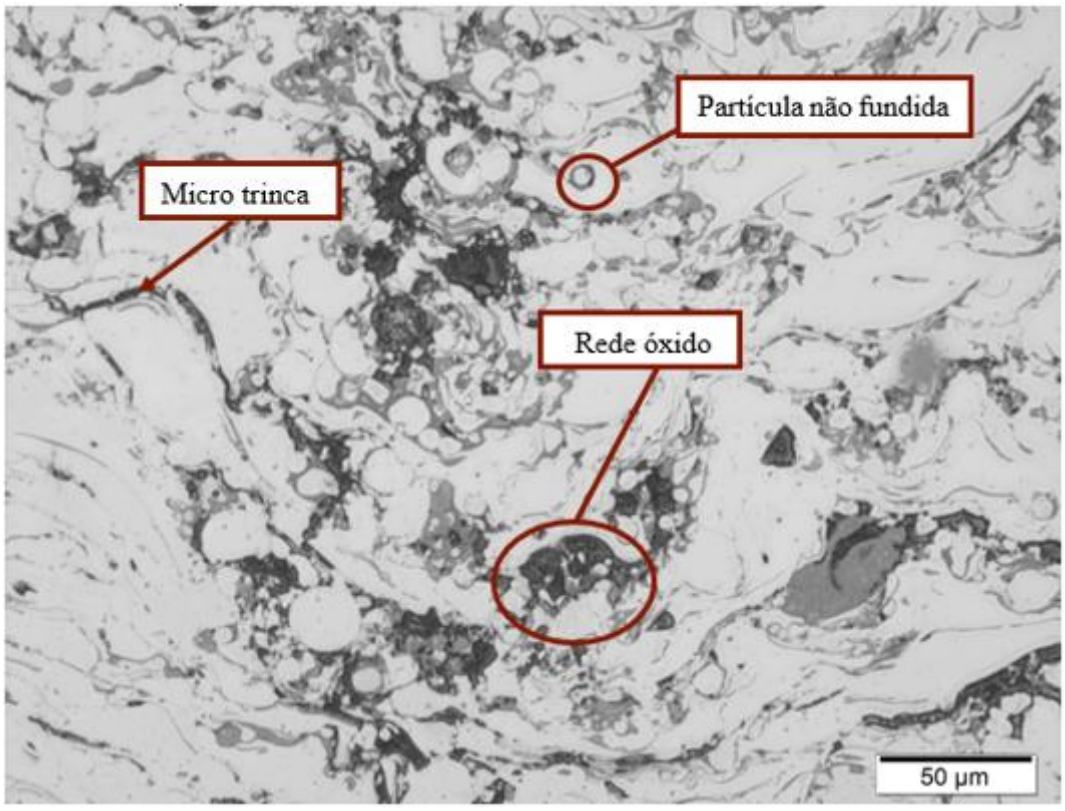


Figura 40 – Imagem em MO do revestimento da condição 1. Aumento de 500x. Fonte: Própria autora.

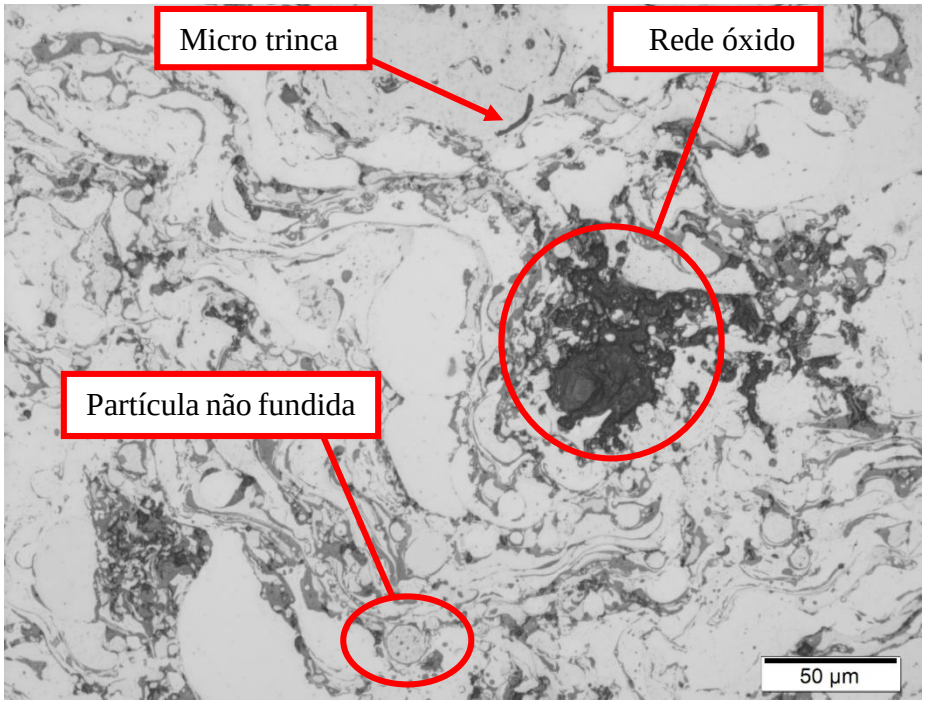


Figura 41 - Imagem em MO do revestimento da condição 3. Aumento de 500x.
Fonte: Própria autora.

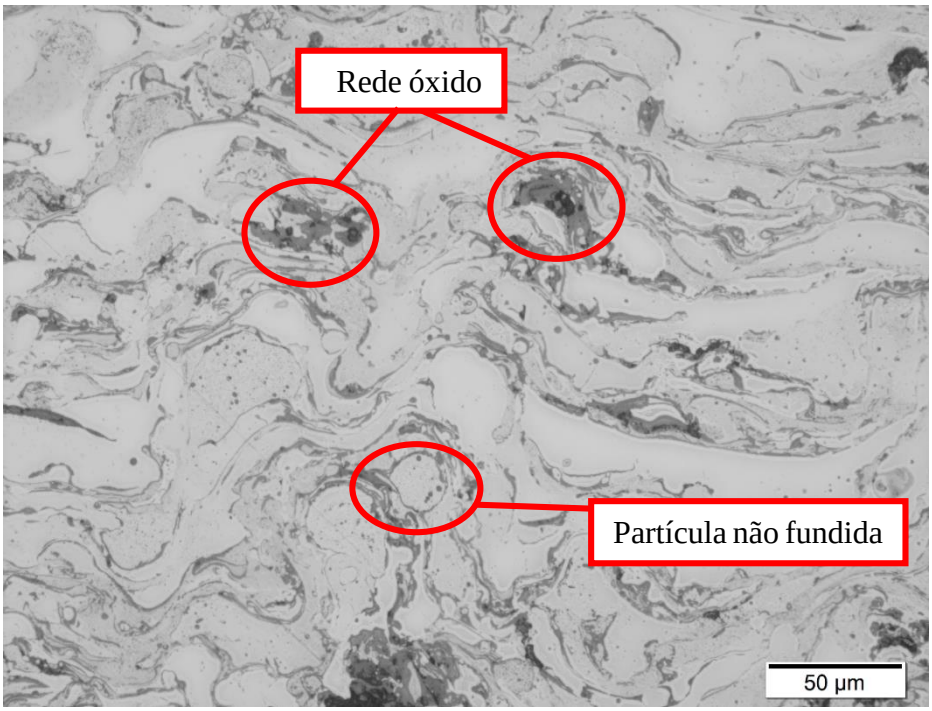


Figura 42 - Imagem em MO do revestimento da condição 4. Aumento de 500x.
Fonte: Própria autora.

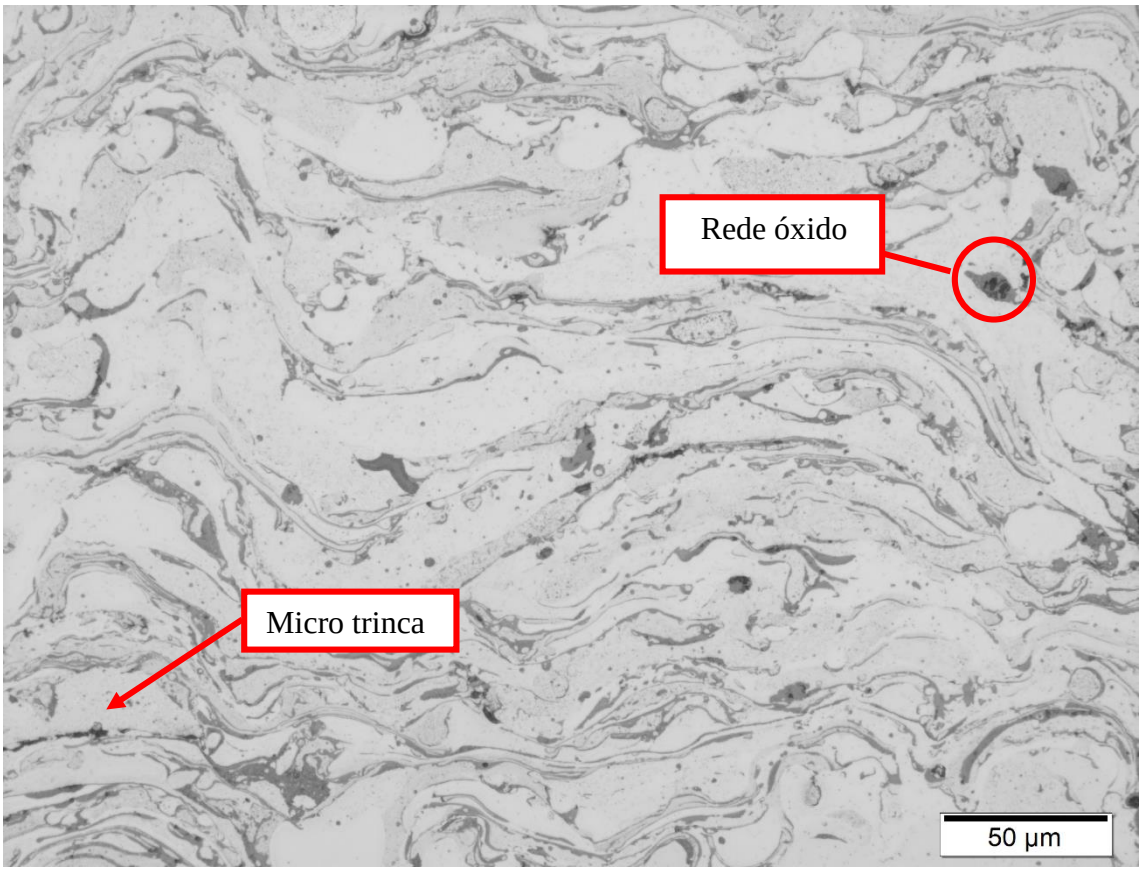


Figura 43 - Imagem em MO do revestimento da condição 5. Aumento de 500x.
Fonte: Própria autora.

Nas imagens de exemplos nota-se além das camadas superpostas, conhecidas como lamelas, regiões com tonalidades mais escuras isoladas ou agrupadas que podem ser pequenos poros ou redes de óxidos, bem como a presença de partículas não fundidas durante a deposição, com formato característico de um círculo. É importante destacar que camadas com tons de cinza diferentes podem ser segundas fases, ou até mesmo marcas de secagem, que não são consideradas no grupo de defeitos.

As imagens obtidas estão dentro do padrão observado por outras literaturas de aspersão térmica. Segundo Lin Chen et al [26] e Andrew et al [27] a microestrutura pode ter uma quantidade menor de defeitos através do 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. Revestimentos aspergidos pela técnica de arco elétrico possuem lamelas mais espessas Bernedt et al [9], de vários tamanhos e com maior quantidade de óxidos do que os revestimentos aspergidos por outros processos,

apresentando também em sua microestrutura, partículas ressolidificadas antes do impacto, estando de acordo com as micrografias obtidas neste trabalho.

Váz [28] estudando revestimentos obtidos por aspersão térmica, indica que o número de poros está relacionado com a distância entre pistola de aspersão e o substrato, a temperatura da fonte de calor, a velocidade das partículas projetadas e o tipo de gás atomizante. A formação de porosidades pode ser reduzida a partir do pré-aquecimento do substrato, a preparação adequada da superfície e a escolha do material do revestimento.

Outro fator importante para controlar a presença de porosidade é o ângulo de aplicação. A porosidade apresenta menor valor quando o ângulo se aproxima de 90° 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 micro trincas, conforme observa Paredes [1].

3.2 Processamento digital de imagem

Conforme descrito na metodologia, foi realizado o processamento e análise digital das imagens obtidas por MO através do *software* FIJI Image. Foram utilizadas 10 imagens de regiões não superpostas, com magnificação de 500x, para cada amostra.

A Tabela 4 mostra os resultados obtidos de percentual de defeitos por área (também podendo ser considerada a fração de defeitos Vv, isto é, fração volumétrica de defeitos) para cada condição estudada. É apresentada uma comparação entre resultados obtidos neste trabalho usando-se o FIJI com os resultados obtidos por Brito [4], referente as mesmas amostras utilizadas em sua dissertação em 2010, e que utilizou o *software* Image-Pro para contagem de defeitos, usando o método de contagem por ponto. Com exceção da condição 1, as demais condições apresentaram resultados muito diferentes aos de Brito [4], entretanto, o autor utilizou 3 amostras de cada condição, e não fez análise de imagem, apenas contagem por ponto. A técnica de PDI possibilita uma avaliação mais criteriosa que a contagem por ponto e com isto os resultados são mais confiáveis. Neste trabalho, a condição com maior percentual de defeitos é a condição 3, logo em seguida é a condição 1. Ambas utilizaram em sua composição o arame b, que tem expressiva presença de

cromo. A condição 5 foi a de menor percentual de defeitos, esta composta pelos arames d e b, destaca-se pela presença de cromo e níquel. A condição 4, que também teve um baixo percentual de defeitos, é formada pela combinação dos arames c e d, com valor expressivo de cobalto e com a presença de níquel.

Tabela 4 – Quantificação percentual de defeitos por área. Fonte: Própria autora e Brito [4].

Quantificação (área de defeitos/área analisada) (%)				
Imagens	Amostra 1	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
1	1,320	1,376	2,349	1,026
2	2,992	1,379	2,450	2,014
3	2,206	5,533	0,759	0,770
4	7,077	3,483	2,274	0,857
5	8,723	6,046	1,583	0,708
6	2,992	1,567	1,116	0,912
7	5,899	7,437	5,640	2,393
8	1,730	3,163	3,009	1,760
9	1,777	6,657	1,825	2,194
10	2,631	6,029	1,446	1,217
Média (%)	3,7	4,3	2,2	1,4
Brito[4]	3,9	1,6	4,7	3,4

A Tabela 5 apresenta o resultado do cálculo de Desvios Padrão quanto a quantificação percentual de defeitos. Nota-se que as amostras 4 e 5, que tiveram menor percentual de defeitos também apresentaram valor de desvio padrão bem baixo, mostrando que os resultados encontrados estão homogêneos. As amostras das condições 1 e 3 também tiveram valores baixos como o esperado, garantindo boa confiabilidade as medidas percentuais de defeitos.

Tabela 5 – Resultados do Desvio Padrão quanto a quantificação de defeitos do atual trabalho. Fonte: Própria autora.

	Amostra 1	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
Desvio Padrão	2,562	2,344	1,370	0,641

Os comportamentos dos 4 revestimentos estão de acordo com a literatura, pois apresentam as características de depósitos em estruturas lamelares espessas e de tamanhos variados, assim como a presença de óxidos e de partículas não fundidas, com aspecto de esferas, que são comuns a tecnologia da aspersão térmica a arco elétrico. Os resultados numéricos também estão dentro do esperado. Conforme a literatura é comum para esse tipo de aplicação de revestimento valores de 2 a 10 % de defeitos. Importante destacar que a distância de aspersão, que quanto menor, menor será a oxidação, uma vez que as partículas fundidas estarão por menor tempo expostas ao oxigênio, Montani[15].

Y Fizi et al [20], em seu trabalho sobre aspersão térmica a arco de um aço inoxidável obtiveram como resultado 5% de defeitos. Também apresentou estrutura de lamelas, camadas escuras definidas como óxidos, poros e partículas não fundidas.

Este percentual pode variar conforme a mudança dos parâmetros utilizados, como pode ser observado no trabalho de Paredes et al. [1]. O intervalo encontrado de porosidade foi entre 5 e 15 % devido aos parâmetros utilizados em cada processo. Normalmente, nos processos de aspersão térmica por arco elétrico, são obtidos valores aceitáveis de porosidade com uma taxa de deposição do fluxo de spray constante e elevada, podendo ter esse valor de porcentagem de defeitos reduzido com a aplicação de selantes. Ambos os resultados apresentados das médias globais das amostras estão em acordo com o presente estudo, podendo observar que esses valores estão abaixo da média de 5%.

Outros autores, Johnston et al. [29] e Tillmann et al. [30], realizaram estudos com relação ao comportamento das amostras com parâmetros diferentes de aspersão térmica, como a distância de aspersão, pressão dos gases de atomização principais e secundários e corrente. Devido a utilização de outros parâmetros a faixa de porosidade encontrada por estes autores é de 1 a 6%.

Pinheiro [31] observa que principais fatores que influenciam os teores de óxidos e porosidades são:

- 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, notou-se melhores condições de oxidação à menores pressões;

A presença de poros é comum em todos os processos de AT, resultante das condições adversas que as partículas sofrem durante a pulverização e ao impacto. A porosidade depende basicamente da velocidade da partícula, ângulo de pulverização, temperatura e tamanho das partículas. Algumas dessas não são fundidas, contribuindo na criação de espaços vazios, formando os poros, ŠIMUNOVIĆ [32].

Carneiro [33] estudando aspectos de resistência à corrosão de ligas de níquel-cromo e cobalto obtidas pelo processo de aspersão térmica por arco elétrico obteve uma camada aspergida bastante uniforme, com um menor percentual médio de defeitos para o revestimento contendo Co. A aspersão térmica por arco elétrico permitiu a produção de camadas de revestimento uniforme formadas por panquecas (estrutura lamelar), contendo baixo percentual de defeitos, como porosidades e inclusões de óxidos. Os dados coletados através do Processamento Digital de Imagem (PDI) mostraram que o revestimento contendo Co apresentou um menor percentual de defeitos (3,28%).

3.3 Microdureza Vickers (HV)

Medidas de microdureza foram realizadas com finalidade de correlacionar os resultados de dureza com o percentual de defeitos encontrados em cada condição.

Conforme descrito na metodologia, foram selecionados 8 pontos randômicos em diferentes regiões dos revestimentos testados para medidas de dureza (HV). A dureza média dos substratos das amostras é de 135HV. A figura 44 exemplifica uma identação feita no Microdurômetro da UERJ.

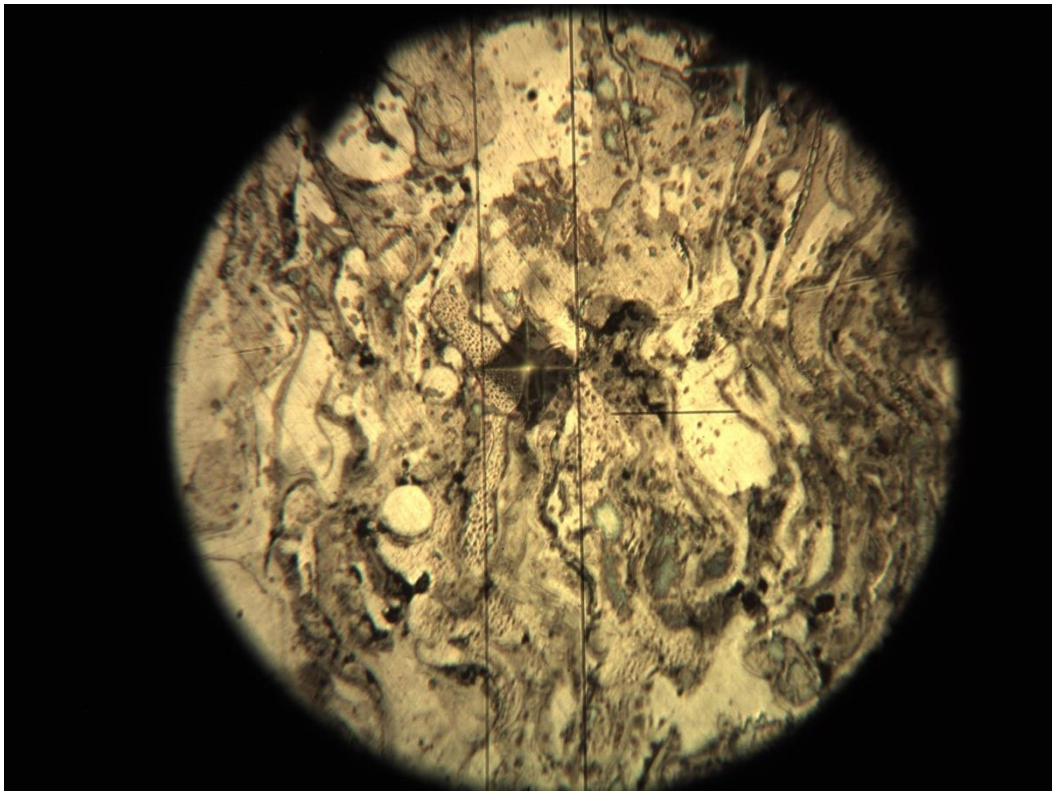


Figura 44 – Identação por Microdurômetro. Fonte: Própria autora.

A Tabela 6 mostra os resultados obtidos nos 8 pontos randômicos para as microdurezas e as compara com os resultados de Brito[4]. Observa-se que a condição com maior dureza foi a 1, onde a liga é formada basicamente por Cr-Ni-Mn.

Tabela 6 – Resultados de microdureza. Fonte: Própria autora e Brito [4].

Pontos	Amostra 1	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
1	750,56	306,36	304,04	391,67
2	599,50	293,83	197,20	431,35
3	649,12	329,34	385,25	287,68
4	754,69	506,65	370,25	245,26
5	521,89	371,93	344,90	353,63
6	394,30	242,40	295,50	240,40
7	595,70	310,90	169,40	340,80
8	474,00	285,10	309,50	304,20
Média (HV)	592,5	330,8	297,0	324,4
Brito [4]	427,2	308,1	280,4	264,5

A Tabela 7, apresenta o resultado do cálculo de Desvio Padrão (DP) quanto aos resultados de microdureza do atual trabalho e correlaciona com os resultados obtidos por Brito[4].

Tabela 7 – Resultados do Desvio Padrão quanto o ensaio de microdureza. Fonte: Própria autora e Brito[4].

	Amostra 1	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
(DP) Erika	127,0	80,1	77,4	67,8
(DP) Brito	121,0	47,0	71,0	52,0

Pode-se notar o elevado desvio padrão nas medidas realizadas, particularmente nas condições 1 e 3 do atual trabalho, ambas com as maiores quantidades percentuais de defeitos medidos (3,7 e 4,3%, respectivamente). Assim, a presença maior de defeitos não parece ter provocado uma diminuição na dureza, mas um aumento na dispersão das medidas e no respectivo desvio padrão.

Na pesquisa de Brito [4], que estudou as mesmas amostras, foi realizado a microdureza de 3 formas, em grãos aleatórios, grãos sem defeitos e na camada de revestimento, este último se assemelha ao estudo deste trabalho, porém foram feitos 9 pontos de identação e calculado a média. Os resultados obtidos neste trabalho estão bem

próximos dos resultados dos revestimentos e Desvio Padrão encontrados por Brito [4], tendo variação considerável somente na amostra 3 quanto ao Desvio Padrão.

Y Fizi et al [20], utilizaram a mesma técnica de aspersão térmica a arco para depositar aço inoxidável AISI 420 em material de baixo aço carbono com finalidade de proteção contra corrosão e desgaste. Aplicou-se uma liga a base de níquel antes do revestimento para aumentar a aderência do mesmo. Na sua pesquisa, efetuou a medida de microdureza antes e depois de submeter a amostra em tratamento térmico (recozimento), obtendo como resultado 174 HV0,5 antes do tratamento e 160 HV0,5 após tratamento térmico. Comparando com os resultados atuais pode-se concluir que o metal, material usado neste trabalho tem cerca de o dobro de dureza de um revestimento por aço inoxidável. Por fim, a dureza do revestimento tratado termicamente é claramente diminuído de forma homogênea com o aumento de plasticidade adquirida com o tratamento térmico, concluíram Y Fizi et al. [20].

Pinheiro [31] estudando Revestimentos que possuem uma média global alta da dureza, mostra que ocorrem discrepâncias no seu aumento conforme a variação da espessura e o número de camadas. O resultado é um comprometimento da otimização das propriedades mecânicas, podendo não obter uma máxima resistência à corrosão ou desgaste devido a formação de inclusões não metálicas que tornam a microestrutura frágil e quebradiça. O trabalho mostra que os Processos de 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 acordo com POLLNOW [34], 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.

3.4 Resultados do ensaio de corrosão

Foi realizada uma análise qualitativa considerando os aspectos das amostras antes e depois do ensaio de corrosão, como também medidas do peso e da espessura do revestimento de cada amostra.

A Tabela 8 apresenta o peso total de cada amostra considerando substrato e revestimento antes e depois do ensaio de corrosão.

Tabela 8 – Comparativo de peso das amostras antes e depois do ensaio de corrosão.

Amostra	Peso inicial (g) antes do teste de corrosão	Peso final (g) após o teste de corrosão
1	8,1078	2,2964
3	8,6978	0,3741
4	11,0984	5,8611
5	17,9811	11,2689

As espessuras dos revestimentos foram medidas através de imagens obtidas por MO, antes e depois dos testes de corrosão e os resultados estão apresentados nas tabelas 9 e figuras 45 a 48. A diferença na espessura inicial pode ter sido causada durante o processo de aspersão térmica, com alteração de algum parâmetro, como a distância da pistola, o número de passes, a tensão ou até na corrente usada.

Tabela 9 – Espessuras dos revestimentos antes e depois do ensaio de corrosão.

Amostra	Espessura inicial (mm)	Espessura final (mm)
1	0,91	0,85
3	0,54	0,55
4	0,91	-
5	0,74	0,77

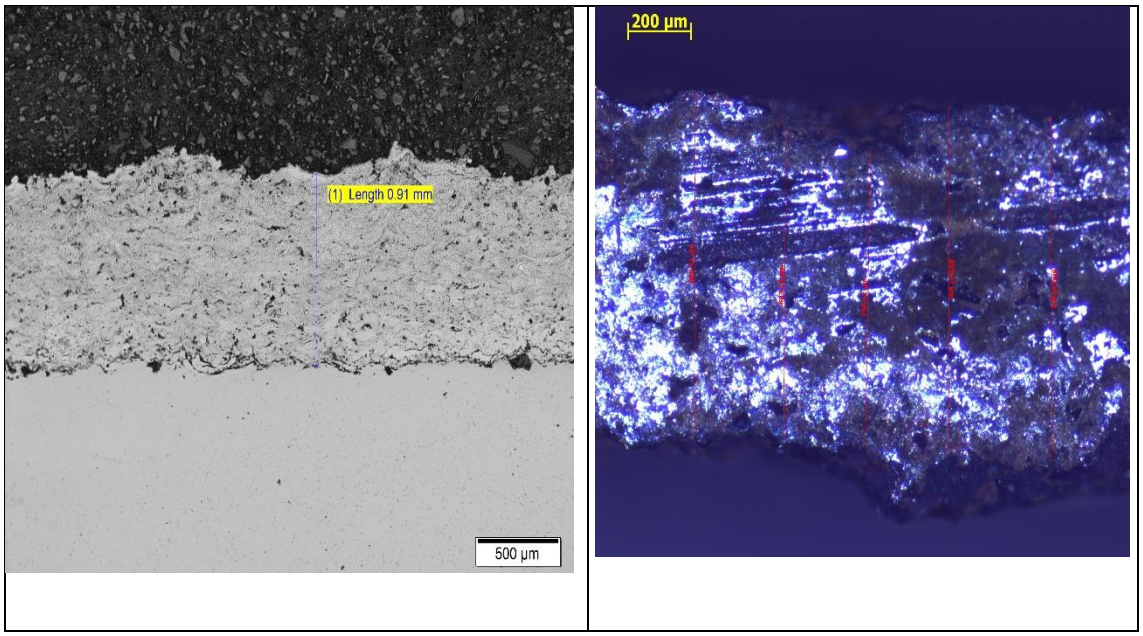


Figura 45 – Espessura da amostra 1. A esquerda antes do ensaio de corrosão e a direita depois do ensaio de corrosão.

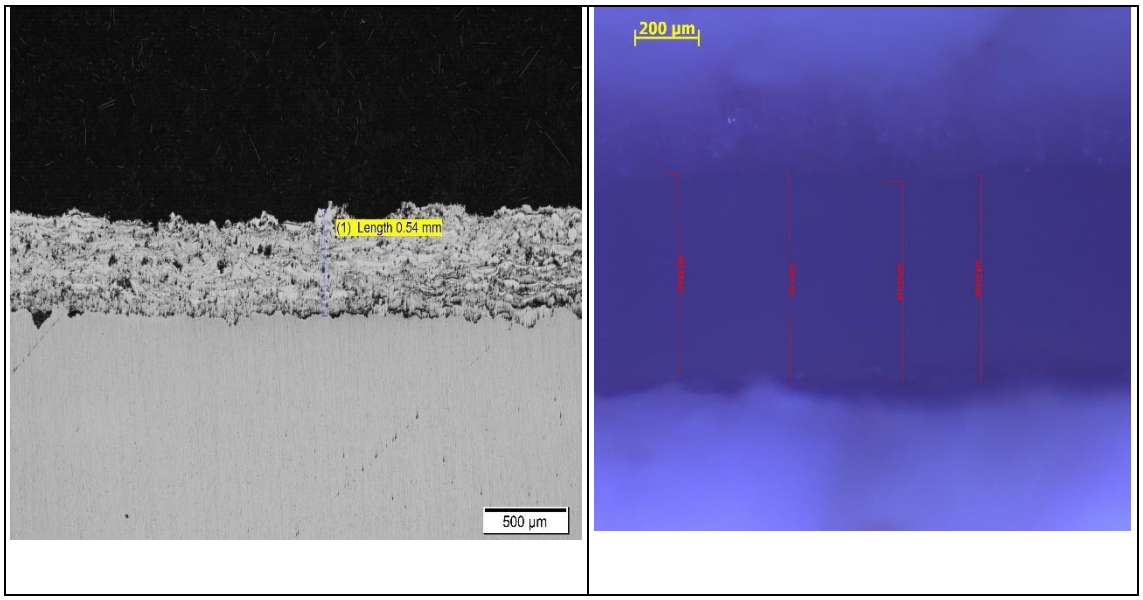


Figura 46 - Espessura da amostra 3. A esquerda antes do ensaio de corrosão e a direita depois do ensaio de corrosão.

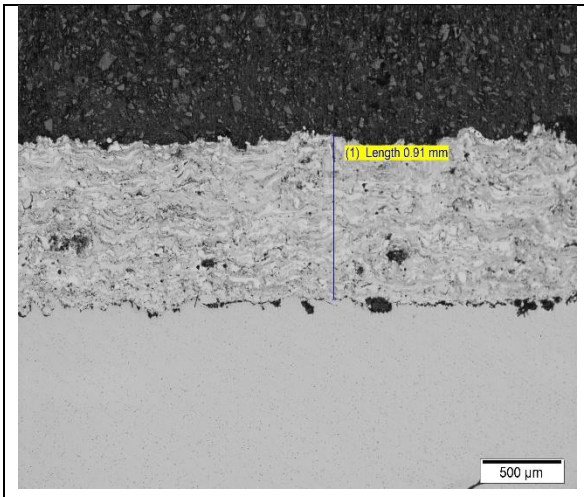
	Não teve espessura útil para ser medida após ensaio de corrosão, pois o revestimento foi totalmente corroído.

Figura 47 - Espessura da amostra 4. A esquerda antes do ensaio de corrosão. Fonte: Própria autora.

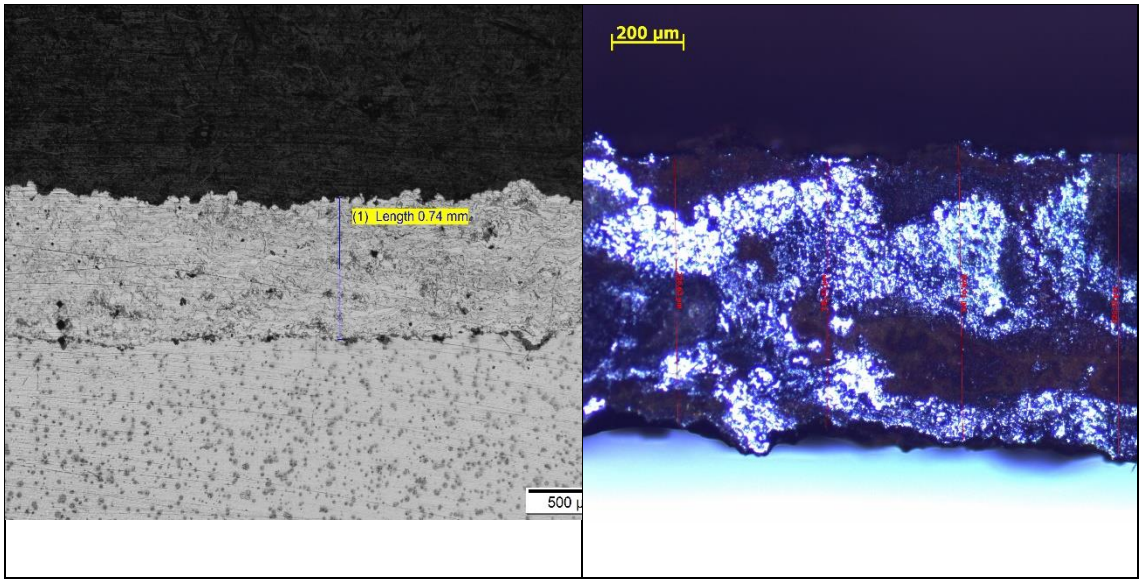


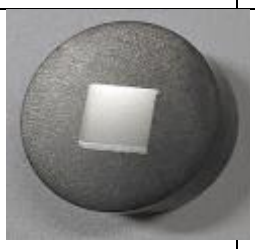
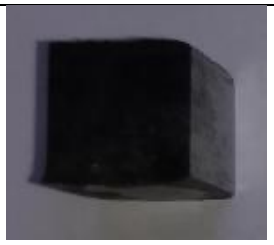
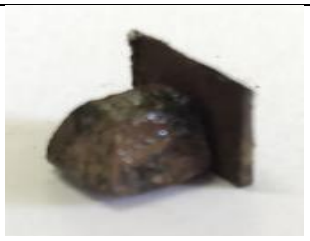
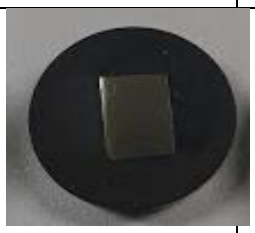
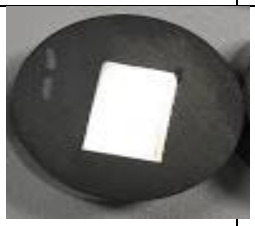
Figura 48 – Espessura da amostra 5. A esquerda antes do ensaio de corrosão e a direita após o ensaio de corrosão. Fonte: Própria autora.

Os resultados mostraram que a diminuição de peso das amostras foi essencialmente proporcionado pela corrosão / deterioração do substrato e não pela corrosão dos revestimentos que permaneceram praticamente com as mesmas espessuras e aspectos, com exceção do revestimento da condição 4. Este último foi totalmente

corroído pelo reagente químico. A solução de Percloreto Férrico teve ação corrosiva conforme o esperado, atacando agressivamente o substrato e pouco afetando o revestimento, exceto a condição 4.

A tabela 10 mostra os aspectos obtidos e que permitiram uma avaliação qualitativa da resistência à corrosão dos revestimentos ao reagente químico que é comumente usado para testar aços inoxidáveis.

Tabela 10 – Aspecto das amostras. Fonte: Própria autora.

Amostras	Embutida	Antes do ensaio de corrosão	Após ensaio de corrosão
1			
3			
4			
5			

A tabela 11 reúne os principais resultados obtidos nas análises realizadas nesta pesquisa e as discussões em seguida no texto.

Tabela 11- Resultados das análises de pesquisa.

	Composição	% Defeitos	Dureza	Revestimento
Amostra 1	Níquel e Boro	3,7	592,5 HV	Estável
Amostra 3	Níquel e Cobalto	4,3	330,8 HV	Estável, porém se desprendeu por inteiro.(Baixa adesão)
Amostra 4	Cobalto e Níquel (+) pequena fração de Cobre, Fósforo, Nitrogênio e Nióbio	2,2	297,0 HV	Deteriorado
Amostra 5	Níquel (+) pequena fração de Cobre, Fósforo, Nitrogênio e Nióbio	1,4	324,4 HV	Estável

A amostra 1, que teve seu revestimento composto pelos arames a e b, com características predominantes de ferro, cromo, níquel e boro, teve um bom comportamento quando submetido ao reagente de percloreto de ferro. O substrato foi bastante deteriorado e o revestimento permaneceu estável, o que pode-se notar pela pequena diferença de espessura e pela imagem de pós ensaio. Esta amostra apresentou valor de dureza elevado comparado as demais amostras em estudo.

A amostra 3, que teve seu revestimento composto pelos arames b e c, com características predominantemente de ferro e cobalto teve um ótimo desempenho, pois pode-se dizer que o revestimento não teve alteração considerável de espessura. Porém o mesmo se desprendeu totalmente do substrato sem ser danificado. Foi a segunda amostra de maior dureza entre as amostras estudadas.

A amostra 4, que teve revestimento composto pelos arames c e d, também era predominantemente de ferro, cobalto, cromo e níquel, porém possuía pequena fração de cobre, fósforo, nitrogênio e nióbio relacionado ao arame d, que nenhum dos outros arames estudados possuíam. Esta amostra foi a de pior comportamento contra o reagente percloreto de ferro. O revestimento foi deteriorado a ponto de não ser possível realizar a medição da espessura após ensaio de corrosão. Destaca-se também por ser a amostra de menor dureza, entre as amostras em estudo.

Por último, a amostra 5, cujo o revestimento era composto pelos arames d e b, possuía como característica principal o ferro, o cromo e o níquel. Esta amostra teve seu revestimento considerado inalterado após o ensaio, mostrando que a combinação dos arames foi ótima para o reagente exposto. Nota-se que para essa combinação a presença da pequena fração de cobre, fósforo, nitrogênio e nióbio pertencentes ao arame d, não foi prejudicial a função do revestimento. Esta amostra teve seu valor de dureza muito próximo a amostra 3.

Brito [4], em seu trabalho, realizou o Ensaio de Corrosão por Névoa Salina, nas mesmas amostras deste estudo. Em seguida calculou a corrosão por área e por ponto. As condições que apresentaram um percentual significativo de cobalto tiveram melhores resultados de taxa de corrosão (maior resistência a corrosão). Explica que provavelmente isso se deve ao fato de o cobalto ser um elemento mais nobre, fazendo com que sua inserção nessas ligas, eleve a resistência a corrosão do revestimento. E conclui que essas análises mostra a eficiência da aplicação de ligas com a presença de cobalto, pelo menos para o uso em ambientes marinhos. Na Tabela 12 pode-se observar os resultados obtidos.

Tabela 12 – Resultados de corrosão superficial dos revestimentos em [%]. Fonte: Brito [4].

Medição por Área	**Condição 1**	**Condição 2**	**Condição 3**	**Condição 4**	**Condição 5**
Amostra 1	40%	12%	94%	42%	62%
Amostra 2	46%	10%	92%	42%	71%
Amostra 3	64%	6%	52%	40%	42%
Média	50%	10%	80%	42%	58%
Medição por Pontos	**Condição 1**	**Condição 2**	**Condição 3**	**Condição 4**	**Condição 5**
Amostra 1	37%	16%	89%	63%	57%
Amostra 2	54%	13%	87%	73%	71%
Amostra3	78%	8%	51%	49%	33%
Média	**56%**	**12%**	**76%**	**62%**	**54%**

A condição 2 não foi objeto de estudo no presente trabalho, mas na pesquisa de Brito[4] foi a que a melhor se comportou no ambiente de corrosão exposto, a Névoa Salina. Esse desempenho diferenciado em relação as demais condições provavelmente se deve a formação de uma película protetora devido a presença de elementos de liga de

tungstênio, boro e principalmente o cobalto, encontrados combinados apenas nesta condição. Já a condição 3 teve o pior comportamento neste tipo de ensaio de corrosão, que está associado a defeitos pré-existentes na estrutura do revestimento, como poros e micro trincas. Deve-se observar que o ensaio realizado por Brito foi feito em condições diferentes ao feitos nesta dissertação, mas os resultados apontam para uma convergência de resultados.

4.0 Conclusão

Analisando os resultados obtidos, a composição química do revestimento de cada amostra e comparando com outros trabalhos, conclui-se que:

1- Os revestimentos apresentaram-se em estrutura lamelar, sugerindo ter boa qualidade, pois esta característica indica a eficiência do processo de aspersão térmica.
2- A presença de óxidos e de poros não diminuíram a dureza, mas provocou um aumento na dispersão das medidas e no respectivo desvio padrão.
3- O revestimento composto por características predominantes de ferro, cromo, níquel e boro teve desempenho excelente para o meio reagente (Percloreto Férrico), assim como a combinação que praticamente só substituiu o elemento cromo pelo cobalto.
4- As condições com maior percentual de defeitos foram as que utilizaram em suas composições o arame que tem expressiva presença de cobalto ou boro. Os valores variaram de 3,7 % a 4,3%, considerados satisfatórios para revestimentos obtidos por aspersão térmica.
5- No ensaio de microdureza observa-se que a condição com maior dureza foi onde o revestimento era formado basicamente por aço de ferro-cromo com B-Ni-Mn.
6- A combinação característica de ferro, cobalto, cromo e níquel com uma pequena fração de cobre, fósforo, nitrogênio e nióbio não reagiu bem ao ambiente corrosivo em estudo.
7- A inserção de cobalto nessas ligas, eleva a resistência a corrosão do revestimento, porém sua eficiência vai variar com quais elementos este será combinado e pra qual ambiente corrosivo será exposto.

5.0 Sugestões para trabalhos futuros

1- Produzir amostras embutidas com apenas os revestimentos expostos e realizar as mesmas análises.
2- Utilizar a técnica de difração de raios-x para quantificação mais precisa dos elementos de liga e tipos de óxidos presentes nos revestimentos estudados.
3- Aplicar outro tipo de ensaio de corrosão para avaliar o comportamento dos revestimentos em diferentes meios.
4- Utilizar outras técnicas de aspersão térmica para comparar com os valores encontrados neste estudo.

6.0 Referência Bibliográfica

[1] PAREDES, R S. C, Projeto de Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagem Especiais, "Aspersão Térmica", Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica, Curitiba PR, 2012.

[2] FREITAS, B. C. “Estudo das Propriedades Microestruturais de Ligas de níquel-cromo e cobalto-cromo obtidas pelo Processo de Metalização a Arco”.Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca). Rio de Janeiro, RJ, 2015.

[3] VREIJLING, M.P.W. “Electrochemical Characterization of Metalic Thermally Sprayed coatings”. Ph.D- Thesis, TNO Institute of industrial Tecnology, Netherlands,1998.

[4] BRITO V.R.S., “Caracterização de Revestimento Metálicos Aspergidos Termicamente por Arco Elétrico”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca). Rio de Janeiro, RJ, 2010.

[5] SIEGMANN, S., ALBERT, C.; “100 years of thermal spray: About the inventor Max Ulrich Schoop”; Surface & Coatings Technology; v. 220; pp. 3-13; November, 2013.

[6] VIRGIL G., MIHAI A. P., IRINEL R. - “Ni-2al - Cladding by Electric Arc Wire Thermal Spraying”. Metalurgia International, 2013.

[7] BRITO V.R.S., COSTA H.R.M., BASTOS I.N., SANTOS T.D., Koronemberger Y., “Estudo das Propriedades de Ligas Fe-Cr usadas como Revestimentos Metálicos Aspergidos Termicamente para aplicações em meios corrosivos.” Intercorr Abraco 2010. Fortaleza. CE. Brasil,2010.

[8] BRANDOLT C.S., “Revestimento de Niquel e Cobalto por Aspersão Térmica por chama Hipersônica(HVOF) em aço API5CT P110”. Dissertação (Mestrado em Ciência e tecnologia dos materiais – Escola de Engenharia da UFRGS). Porto Alegre, RS, 2014.

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

[10] ANTUNES, F. J., BRITO, V.R.S., COSTA H.R.M., BASTOS I.N., CAMPOS J. B. e AGUIAR R.A.A, “Correlation Between Chemical Composition and Adherence of Cr and Co Coatings Deposited by Electric Arc”. The Journal of Adhesion, 2015.

[11] BLUM, M. “Análise da Integridade de Uniões de Juntas Coladas em Correias Transportadoras em Função da Temperatura e Velocidade”. Projeto de graduação, PUCPR- Curitiba, 2008.

[12] PADILHA, ÂNGELO F., Livro Materiais de Engenharia – “Microestrutura e Propriedades”, Hemus Livraria. Editora e Distribuidora S.A. 2a Edição, 2007.

[13] LIMA, C.R.C.; TREVISAN, R.D.E., “Ensaio de Adesão em Revestimentos Metal-Cerâmicos Obtidos por Aspersão Térmica a Plasma”. Paper 1999.

[14] MARQUES, P.V., Informação Técnica Infosolda "Aspersão Térmica", Universidade federal de Minas Gerais, Engenharia Mecânica, 2003.

[15] MONTANI, U.R.D.S., “Quantificação de Defeitos por Processamento Digital de Imagens em Revestimentos obtidos por Aspersão Térmica”. Dissertação de mestrado, UERJ, 2016.

[16] ALENCAR, G.T. D. M., “Efeitos da Adição de carbonetos na resistência aos desgastes e à corrosão de uma liga autofluxantes depositada por aspersão Térmica”. São Carlos, 2009.

[17] BENGTSON. P. e JOHANNESSON, T. "Characterization of Microstructural Defects in Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coatings” - Journal of Thermal Spray Technology, 1995.

[18] WEI-WEI ZHANG, GUANG-RONG LI, QIANG ZHANG1, GUAN-JUN YANG. – “Multiscale Pores in TBCs for Lower Thermal Conductivity ASM International”, 2017.

[19] PAVEL, C., RADKA L., BENEŠ, V., – “Quantitative analysis of pores of two types in a plasma-sprayed coating” - Materials Characterization, 2006.

[20] FIZI, Y., MEBDOUA, Y., LAHMAR, R., LAKHDARI, Y., TOUAZI, “The Indentation Behaviour of Wire Arc Sprayed Stainless Steel Coating”, 7 de janeiro de 2016.

[21] GENTIL, V., “Corrosão”, Brasil, LTC Editora, Rio de Janeiro, Brasil. 2003.

[22] ROBERGE, P. R., “Handbook of corrosion engineering”. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, c2012.

[23] ARAUJO, A.A., “Gerenciamento de falhas por corrosão em dutos”, Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2012.

[24] GARCIA, A., et al; Ensaios dos materiais. Rio de Janeiro: LTC; 2º edição, 2000.

[25] MAHESH, R.A., JAYAGANTHAN R., and PRAKASH, S., “Characterisation of HVOF Sprayed NiCrAlY - 0,4 wt-%CeO2 Coatings on Superalloys”, Surface Engineering, Vol 24, No. 5. 2008.

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

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

[28] VÁZ, R. F. “Estudo de partículas metálicas aspergidas pelo processo de Aspersão térmica por arco elétrico”, Dissertação de mestrado, PG-MEC/UFPR, Curitiba, PR, Brasil, 2013.

[29] JOHNSTON, A. L., HALL, A. C., MCCLOSKEY, J. F., Paper "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.

[30] TILLMANN, W., VOGLI, E., ABDULGADER, M., Paper "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.

[31] PINHEIRO, N. R., “Avaliação da liga cr-ni-mn usada como revestimento e obtida pelo processo de aspersão térmica”, Dissertação de mestrado, CEFET/RJ, 2017.

[32] ŠIMUNOVIĆ, K., “Thermal Spraying Welding Engineering and Technology: Thermal Spraying”, pp. 1-25. London: Ed. Eolss Publishers, 2010.

[33] CARNEIRO, M. R. D., “Aspectos de resistência à corrosão de ligas de níquel-cromo e cobalto-cromo obtidas pelo processo de aspersão térmica por arco elétrico”, Dissertação de mestrado, CEFET/RJ, 2016.

[34] POLLNOW, E., N., Paper 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.