AVALIAÇÃO DA ADESÃO E QUANTIFICAÇÃO DE DEFEITOS EM REVESTIMENTOS METÁLICOS DEPOSITADOS POR PROCESSO ARCO ELÉTRICO (ARC-SPRAY)

Caroline Alexandre de Lucena

Dissertação de Mestrado apresentada 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.

Orientador:
Hector Reynaldo Meneses Costa, D.Sc. (Orientador)

Rio de Janeiro,

Agosto de 2018

AVALIAÇÃO DA ADESÃO E QUANTIFICAÇÃO DE DEFEITOS EM REVESTIMENTOS METÁLICOS DEPOSITADOS POR PROCESSO ARCO ELÉTRICO (ARC-SPRAY)

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.

Caroline Alexandre de Lucena

Aprovado por:

_____

Presidente, Prof. Hector Reynaldo Meneses Costa, D.Sc. (Orientador)

_____

Prof. Ricardo Alexandre Amar de Aguiar, D.Sc.

_____

Prof. José Brant de Campos, D.Sc., UERJ

Rio de Janeiro,

Agosto de 2018

CEFET/RJ – Sistema de Bibliotecas / Biblioteca Central

L935 Lucena, Caroline Alexandre de
Avaliação da adesão e quantificação de defeitos em revestimentos metálicos depositados por processo Arco Elétrico (ARC-SPRAY) / Caroline Alexandre de Lucena.—2018.
86f. : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2018.
Bibliografia : f. 80-86
Orientador : Hector Reynaldo Meneses Costa

1. Revestimentos em metal. 2. Aspersão térmica. 3. Processamento de imagens - Técnicas digitais. 4. Tecnologia dos materiais. 5. Resistência dos materiais. I. Costa, Hector Reynaldo Meneses (Orient.). II. Título.

CDD 672.73

Elaborada pela bibliotecária Mariana Oliveira CRB-7/5929

“Faça ou não faça. Tentativa não há“.

Mestre Yoda

AGRADECIMENTOS

Á Deus, por todas as alegrias, pela saúde e força que me concedeu para chegar até aqui.

Aos meus queridos familiares, principalmente a minha mãe Maria e irmão Leonardo, por tudo aquilo que me ensinaram e por sempre estarem do meu lado. Obrigado pelo carinho e compreensão!

Ao admirável orientador Prof. Hector Reynaldo Meneses da Costa por todo conhecimento transmitido, ajuda e conselhos que possibilitaram a execução deste trabalho.

À Empresa VGK Engenharia e ao Engenheiro Guilherme W. Bungner, pelo fornecimento de todas as amostras estudadas.

À professora Marília Garcia Diniz, do Departamento de Engenharia Mecânica da UERJ, pela ajuda para aprender o programa FIJI – ImageJ e pelas orientações e conhecimentos transmitidos para aplicar no Processamento Digital de Imagem.

Ao graduando e aluno de IC Fernando Matos e ao técnico Hiron Akira do Laboratório LASMAT/CEFET, pela ajuda e apoio em boa parte dos experimentos efetuados.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Finalmente, agradeço ao Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET por ter aberto às portas para o aprimoramento do meu desenvolvimento acadêmico.

RESUMO

AVALIAÇÃO DA ADESÃO E QUANTIFICAÇÃO DE DEFEITOS EM REVESTIMENTOS METÁLICOS DEPOSITADOS POR PROCESSO ARCO ELÉTRICO (ARC-SPRAY)

Caroline Alexandre de Lucena

Orientador:
Hector Reynaldo Meneses Costa

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

Este trabalho tem como objetivo analisar as propriedades dos revestimentos metálicos de ligas de NiCr e CoCr obtidos pelo processo de aspersão térmica a arco elétrico em substrato de aço carbono e quantificar os defeitos por processamento digital de imagens, usando o software FIJI Image. Primeiramente, foi realizada uma análise microestrutural por microscopia óptica (MO) em três amostras com mesma composição e revestimento, porém com geometrias distintas, e as propriedades dos revestimentos foram comparadas a partir desses resultados sendo utilizado como base para o processamento digital de imagens (PDI), através da quantificação de defeitos para analisar a qualidade do revestimento. E foi realizado numa das amostras o ensaio de microdureza para analisar a resistência do revestimento. Também foi utilizado o ensaio de aderência que foi realizado em duas placas com revestimentos distintos para avaliar a adesão e resistência do revestimento. Os resultados obtidos por MO e PDI mostraram uniformidade na camada aspergida com pequena quantidade de óxidos e porosidades, apresentando uma média global de defeitos de todas as condições de 1,29%. Em relação ao ensaio de aderência, a resistência à tração de adesão média global foi de 17,93 MPa. Já o ensaio de microdureza apresentou uma resistência média global de 362,0 HV_{300} com valores superiores aos da média do substrato de 192,9 HV_{300}. Portanto, os resultados foram satisfatórios tendo em vista que o aumento da resistência demonstra os benefícios adquiridos pelo processo de revestimento de materiais metálicos através da aspersão térmica.

Palavras-Chave: Aspersão térmica, Revestimentos metálicos, Processamento Digital de Imagens, Caracterização.

ABSTRACT

EVALUATION OF ADHESION AND QUANTIFICATION OF DEFECTS IN METALLIC COATINGS DEPOSITED FOR ARC-SPRAY

Caroline Alexandre de Lucena

Advisor:

Hector Reynaldo Meneses Costa

Abstract of dissertation submitted to Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Mechanical Engineering and Materials Technology.

The objective of this work is to analyze and evaluate the properties of the metallic coatings of NiCr and CoCr alloys obtained by the electric arc thermal spray process on carbon steel substrate and to quantify the defects by digital image processing using the *FIJI Image* software. Firstly, a microstructural analysis was carried out by optical microscopy (OM) in three samples with the same composition and metallic coatings, but with different geometries, and the properties of the coatings were compared using these results, being used as the basis for digital image processing (DIP) through the quantification of defects by porosity. Then the microhardness test to analyze the strength of the coating was also carried out in one of the samples. In addition to the adhesion test that was performed on two plates with distinct coatings to evaluate the adhesion and resistance of the coating. From the results obtained in OM and PDI, both showed uniformity in the aspergid layer with small amount of oxides and defects. According to the adhesion test, the overall average adhesion tensile strength was 17.93MPa. The microhardness test presented an overall mean resistance of $362,0HV_{300}$ with values higher than the substrate mean of $192,9HV_{300}$. Therefore, the results were satisfactory in view of the increase of the resistance demonstrates the benefits acquired by the coating process of metallic materials through thermal spraying.

Keywords: Thermal spraying; Metallics coatings; Characterization; Digital Image Processing

Sumário

1 Introdução 14
2 Revisão Bibliográfica 16
2.1 Níquel e suas ligas 16
2.2 Cobalto e suas ligas 16
2.3 Cromo e suas ligas 17
2.4 Aspersão Térmica 18
2.4.1 Processo da Aspersão Térmica 19
2.4.2 Comparando os processos de Aspersão Térmica 23
2.5 Características dos revestimentos depositados por Aspersão Térmica 23
2.5.1 Aderência 25
2.5.2 Porosidade 27
2.5.3 Óxidos 30
2.5.4 Microtrincas 31
2.5.5 Partículas não fundidas de Microestrutura Esferoidizada 31
2.5.6 Pós-tratamento dos Revestimentos 32
3 Metodologia experimental 34
3.1 Materiais e Procedimento 34
3.2 Preparação das amostras 36
3.3 Microscopia Óptica 40
3.4 Ensaio de Aderência 41
3.5 Processamento Digital de Imagem (PDI) 44
3.5.1 Pré-Processamento 45
3.5.2 Segmentação/Limiarização 48
3.5.3 Pós- Processamento 49
3.5.4 Análise das partículas 51
3.6 Ensaio de Microdureza Vickers 54
4 Resultados e Discussão 56
4.1 Microscopia Óptica 56
4.2 Ensaio de Aderência 60

4.3 Processamento de Imagem (PDI) 67
4.4 Ensaio de Microdureza 73
5 Conclusões 78
6 Sugestão para trabalhos futuros 79
7 Referências Bibliográficas 80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Os principais processos de Aspersão térmica [21]. 19
Figura 2 – Layout do processo de aspersão térmica: (1) fornecimento de gás, (2) fornecimento de energia, (3) painel de controle, (4) alimentador de pó / fio, (5) tocha de aspersão e (6) substrato [21]. 20
Figura 3 – Esquema de aspersão térmica por arco elétrico [26]. 21
Figura 4 - Estrutura típica de um revestimento depositado por aspersão térmica [49]..... 24
Figura 5 – Esquema simplificado do Ensaio de Aderência (“Pull - off ”) [28]. 26
Figura 6 - Esquema simplificado dos sete tipos de porosidades encontrados em revestimentos por aspersão térmica [44]. 28
Figura 7 - Aplicação parcial do selante após revestimento na placa e no eixo..... 37
Figura 8 - Desenho esquemático do Ensaio de Aderência (Pull – Off) [24]. 41
Figura 9 – Equipamento utilizado no Ensaio de Aderência – Pull – Off..... 42
Figura 10 – Interface do software Fiji Image..... 44
Figura 11 – Seleção da imagem em File>Open. 46
Figura 12 – Seleção da região da amostra a ser analisada, através do comando Image>Crop. 47
Figura 13 – Adequando a micrografia aos tons de cinza específicos para a análise, através do comando Image>Type>8-bit..... 47
Figura 14 – Imagem duplicada a fim de poder comparar a imagem original com a imagem editada, através do comando Image>Duplicate..... 47
Figura 15 – Ajuste de brilho e contraste, através do comando Image>Adjust>Brightness/Contrast. . 48
Figura 16 – Segmentação da imagem identificando os defeitos pelo seu contorno, através do comando Image>Adjust>Threshold. 49
Figura 17 – Suavização dos objetos e parte dos ruídos na imagem, através do comando Process>Binary>Open. 50
Figura 18 – Remoção de partículas bem pequenas dos ruídos, através do comando Process>Noise>Remove Outliers. 51
Figura 19 – Configuração da quantificação dos defeitos, através do comando Analyze>Analyze Particles..... 52
Figura 20 – Resultado da quantificação dos defeitos, através do comando Analyze>Analyze Particles 53
Figura 21 – A porcentagem de área correspondente aos elementos segmentados (Summary) 53
Figura 22 – Representação esquemática do Ensaio de Dureza [67]. 54
Figura 23 - Desenho com o posicionamento das indentações. 55
Figura 24 - Aumento de 200x e Aumento de 500x (A1 - 500X - 1), respectivamente..... 57
Figura 25 - Aumento de 200x e Aumento de 500x (A1P - 500X - 1), respectivamente. 57
Figura 26 - Aumento de 200x e Aumento de 500x (A4 - 500X - 1), respectivamente..... 58
Figura 27 - Desenho esquemático para interpretação de resultados [71]. 60

Figura 28 – Aspecto da placa 1 com e sem selante – Pino A e Pino B (Ambos centralizados e sem polimento) 61
Figura 29 – Aspecto da placa A1.P – CoCr.Epo sem selante – Pino B1 (Próximo do selante e com polimento) 62
Figura 30 – Aspecto da placa 2 sem selante e com selante – Pino C e Pino D (ambos centralizados e sem polimento) 63
Figura 31 – Aspecto da condição 2 com e sem selante – Pino C1 (Próximo do selante e com polimento). 64
Figura 32 – Gráfico da distribuição dos percentuais de defeitos das amostras A1.E - Dic, A1.P - Dic e A4.E – Cre. 69
Figura 33 – Aspecto microestrutural da região da amostra A1 500x – 10 (A1.E – NiCr.Dic) com 0,26% de defeitos. 71
Figura 34 – Aspecto microestrutural da região da amostra A1P 500x – 8 (A1.P – NiCr.Dic) com 0,68% de defeitos 71
Figura 35 – Aspecto microestrutural da região da amostra A4 500x – 4 (A4.E – NiCr.Cre) com 1,248 % de defeitos. 72
Figura 36 – Aspecto microestrutural das indentações na 1ª, 2ª e 3ª Colunas da região da amostra A1.P – NiCr.Dic, respectivamente. 75
Figura 37 – Gráfico da distribuição das medições de microdureza nas três colunas do revestimento da amostra A1P 75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo entre os principais parâmetros entre alguns tipos de processos de aspersão térmica [29]. 23
Tabela 2 - Comparativo dos percentuais de porosidade e dos parâmetros relevantes dos processos de aspersão térmica [23,30] 27
Tabela 3 - Comparativo dos percentuais de óxidos nas camadas de Al de cada processo de aspersão térmica [23,30]. 30
Tabela 4 – Composição química do Substrato utilizado no Processo AT a Arco Elétrico das placas e eixos [56]. 34
Tabela 5 - Composição química dos arames. (Valores >0.01% não foram apresentados) [56]. 35
Tabela 6 - Combinação dos arames e o revestimento resultante para cada condição [56] 35
Tabela 7 – Propriedades físicas dos arames [56]. 36
Tabela 8 – Propriedades dos selantes [56]. 38
Tabela 9 – Detalhe das condições estudadas nas placas [57]. 39
Tabela 10 – Detalhe das condições estudadas das amostras [56] 40
Tabela 11 – Amostras fabricadas no LAMAT [56] 40
Tabela 12 – Detalhe das condições estudadas no Ensaio de Aderência – Pull – Off. 43
Tabela 13 – Intervalos de Força de Ensaio de Dureza [77] 54
Tabela 14 – Descrição dos Tipos de Falha [71] 60
Tabela 15 – Resultados do Ensaio de Aderência por Tração. 65
Tabela 16 – Comparativo da resistência à tração de adesão média global do trabalho atual e de outros resultados. 66
Tabela 17 – Percentual de porosidade das amostras A1.E – NiCr.Dic,A1.P – NiCr.Dic,A4.E – NiCr.Cre (Média aritméticas, Variâncias e Desvio padrões) 68
Tabela 18 – Comparativo de percentual de defeitos com outros trabalhos 72
Tabela 19 – Medições de Microdureza Vickers HV 300, médias e desvio padrão na amostra A1.P – NiCr.Dic. 74
Tabela 20 – Comparativo de Microdureza com outros trabalhos 77

LISTA DE ABREVIATURAS

A - Amostra

ASP – "*Arc Spraying"*

AT – Aspersão Térmica

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

CEFET/RJ – Centro Federal de Educação Tecnológica

Co – Cobalto

Cr – Cromo

Cre – Selante S1

D.Sc. – "*Doctor of Science*"

Dic – Selante S2

E – Eixo

EBSD – "*Electron BackScatter Diffraction*"

FS – "*Flame Spraying"*

HVOF – "*High Velocity Oxigen Fuel"*

LAMAT – Laboratório de Metalografia

MET – Microscopia Eletrônica de Transmissão

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MO – Microscopia Óptica

Ni – Níquel

P – Placa

PDI – Processamento Digital de Imagens

SAE – "*Society of Automotive Engineers*"

TBC – "*Thermal Barrier Coatings"*

1 Introdução

Acredita-se que o Suiço Max Ulrich Schoop seja o "pai" da tecnologia de Aspersão Térmica (AT), pois ele apresentou as duas primeiras patentes na Alemanha e na Suíça para um processo de aspersão térmica de metais que forneceu "revestimentos metálicos densos" no ano de 1909. Esta invenção foi baseada sobre a conhecida observação de seus filhos atirando com armas Flobert no jardim, onde as balas de chumbo formaram *splats* ao bater na parede. No início, o processo utilizava jatos de vapor e ar comprimido que aquecia e projetava o metal fundido na direção do material a ser aspergido [1].

Com o objetivo de buscar alternativas de custo acessível e bom desempenho para melhorar e aumentar a vida útil de máquinas e equipamentos expostos a ambientes marinho severos e proteger as superfícies metálicas de danos, causados pela corrosão, uma alternativa muito utilizada é o revestimento obtido por Aspersão Térmica. Este processo consiste em aplicar uma camada de revestimento sobre um determinado material, chamado de substrato. Sendo o revestimento formado pelo aquecimento das partículas seja pelo calor gerado da combustão ou pela formação do arco elétrico, que são aceleradas por gás comprimido dentro de um feixe e são aspergidas sob o substrato [2].

Os benefícios proporcionados pelo processo de aspersão térmica são resistência ao desgaste superficial, condutividade ou isolamento elétrico e térmico. Observa-se uma elevada vida útil das superfícies revestidas, a possibilidade de reparos imediatos em áreas danificadas e a utilização logo após sua aplicação. Foram desenvolvidas uma grande variedade de ligas e materiais para serem utilizados no processo, com o intuito de produzir revestimentos capazes de resistir a acréscimos nas solicitações térmicas e mecânicas nas mais diversas condições de serviços [1] [2].

Apesar dos benefícios citados, a aspersão térmica necessita de uma série de estudos para analisar as particularidades de cada variação nos parâmetros do processo, composição química e os mecanismos de adesão envolvidos na formação do revestimento, com o intuito de otimizar as propriedades mecânicas do revestimento gerando uma microestrutura com qualidade o suficiente para elevar as propriedades mecânicas do substrato e protege-lo com a sua aplicação.

A dissertação tem como objetivo a avaliação do revestimento a base de níquel-cromo e cobalto-cromo depositados por aspersão térmica a arco elétrico em substratos de aço carbono SAE 1020, analisar as características dos parâmetros utilizados no processo de AT e consequentemente avaliar a influência de três tipos de selantes diferentes. Assim como a forma geométrica dos substratos influenciaram na microestrutura do revestimento formada e na otimização da microdureza.

Sendo as principais etapas para analisar as propriedades dos revestimentos divididas em:

Realizar a quantificação dos defeitos por Processamento Digital de Imagens a fim de quantificar a presença de porosidades, trincas e rede de óxidos. E compara-los com os resultados da literatura e com trabalhos anteriores.

Realizar o Ensaio de Aderência ou Ensaio de Pull-Off com o intuito de verificar a adesão dos revestimentos, mostrando qual o revestimento tem o melhor desempenho em comparação também aos resultados obtidos de outros trabalhos.

Realizar o Ensaio de Microdureza para gerar o perfil de dureza e verificar se houve um aumento da dureza do revestimento em relação ao substrato.

2 Revisão Bibliográfica

Este Capítulo foi destinado ao estudo do Processo de Aspersão Térmica e todas as variáveis envolvidas no processo e que podem influenciar positivamente ou negativamente, como , por exemplo, aderência, porosidade, óxidos, pré e pós-tratamento dos revestimentos, que podem ser aplicadas na fabricação de revestimentos e se aplicam aos diversos tipos de processo. Como o processo de aspersão térmica utilizado na fabricação do revestimento foi o Arco elétrico, o destaque será maior na Aspersão Térmica e nas características dos revestimentos inerentes desse processo.

2.1 Níquel e suas ligas

O Níquel e suas ligas desempenham papel importante na indústria moderna, no que diz respeito a sua utilização em condições críticas e severas de operação conferindo resistência elevada. Esses materiais apresentam boas propriedades mecânicas, boa resistência em ambientes corrosivos, são resistentes à elevadas temperaturas (fluência) [3].

Quanto a sua aplicação em revestimentos a sua finalidade é melhorar a proteção contra a corrosão e dar um melhor acabamento ao substrato, incluindo aço, alumínio e materiais poliméricos [4].

Muitos trabalhos vêm sendo realizados com o intuito de avaliar e desenvolver cada vez mais revestimentos de ligas de níquel por aspersão térmica. Por exemplo, no trabalho de Bezerra [4] foi analisado o comportamento de uma liga de NiCr através de três diferentes processos de aspersão térmica e depois foi comparado os resultados obtidos com os aços inoxidáveis e a elevada resistência à corrosão da liga de NiCr.

Quanto a sua utilização, os materiais intermetálicos de NiAl são utilizados na indústria aeroespacial e em outras industrias avançadas. As combinações com aplicações de revestimentos por aspersão térmica a plasma apresentaram bons resultados [5]. Assim, como as opções de revestimento com a combinação de Ni (Si) /Ni_5Si_2 que melhorou a resistência a corrosão e oxidação [6].

2.2 Cobalto e suas ligas

O Cobalto e suas ligas possuem propriedades mecânicas semelhantes às ligas de níquel, apresentando grande resistência a corrosão e resistência à elevadas temperaturas. Porém, o que difere essas ligas é o seu modo de aplicação. As ligas de Cobalto são predominantemente utilizadas em componentes, onde a resistência ao desgaste é exigida e dependendo da composição química da liga a sua aplicação irá variar [7].

Apesar das suas vantagens, o cobalto possui a desvantagem de ser um elemento químico relativamente raro na crosta terrestre e isso consequentemente gera o aumento do seu custo no mercado [8].Entretanto, pesquisas recentes vêm sendo realizadas em busca de novos meios de obtenção do cobalto [9].

Em alguns trabalhos, as ligas de WC - Co apresentaram a menor quantidade de oxidação no revestimento pelo processo de aspersão térmica HVOF e consequentemente apresentaram as melhores propriedades se comparadas com os revestimentos processados por plasma atmosférico [10,11].

A fim de se obter uma combinação de propriedades nos revestimentos, estudos vêm descobrindo que a adição de níquel em matrizes de carbetos cimentados, no lugar do cobalto gerou um aumento na resistência a corrosão e uma diminuição na resistência ao desgaste [3].

2.3 Cromo e suas ligas

O cromo e suas ligas possuem as propriedades mais importantes, que devem ser encontradas em um revestimento, que são a resistência à corrosão, resistência à abrasão e ao desgaste, dureza, textura da superfície e brilho [12]. Mas como desvantagem devido às altas tensões residuais internas de tração a resistência à fadiga é reduzida [13].

Existem duas classes de revestimentos de cromo que são o decorativo e o duro. O cromo decorativo é um revestimento de espessura fina com a finalidade de evitar manchas na superfície e uma maior resistência à corrosão associada a aparência decorativa. Já o cromo duro é um revestimento de espessura grossa com a finalidade de trazer uma maior resistência ao desgaste e baixo coeficiente de atrito [14].

Quanto a sua utilização, estudos indicam que revestimentos a base de cromo apresentam risco de toxicidade à espécie humana e ao meio ambiente, além do custo elevado, que geram pressões para encontrar alternativas para substituir o cromo, como por exemplo, a utilização de processos de aspersão como plasma ou combustão de baixa velocidade. Indústrias aeronáuticas estão considerando o uso revestimentos de carbeto de tungstênio por aspersão térmica por HVOF como sendo uma alternativa [15,16].

Quanto a sua aplicação nos revestimentos, o cromo duro é o revestimento eletrodepositado mais utilizado por gerar altos níveis de dureza, resistência ao desgaste e corrosão e baixo coeficiente de atrito [17]. Entretanto, existem algumas limitações de alguns materiais que não aceitam revestimento com cromo duro, como por exemplo, o ferro fundido cinzento devido à alta porosidade e teor de grafite, metais com problemas na superfície (como inclusões, precipitações e porosidades) e metais com tratamento de nitretação (a banho de sais, gasosa ou plasma), oxidação negra e fosfatização [17].

Em alguns trabalhos, como por exemplo, no trabalho de Souza *et. al.* [13] foi comparada a influência dos revestimentos de WC-12Co e WC-17Co por aspersão térmica por HVOF com o cromo duro eletrodepositado e tanto o WC-12Co como o WC-17Co, apresentaram melhores resultados de resistência à fadiga, desgaste abrasivo e resistência à corrosão do que o cromo duro. Enquanto outros trabalhos têm identificado que um aço com revestimento de cromo duro resiste ao desgaste entre cinco a oito vezes mais que o mesmo aço sem o revestimento de cromo duro [18].

2.4 Aspersão Térmica

A aspersão térmica é um processo onde os materiais de revestimento (metálicos e não metálicos) são fundidos ou semifundido e são depositadas sobre a superfície do substrato a ser revestida. O material de revestimento é depositado sobre o substrato utilizando uma corrente de gás ou ar comprimido dependendo do processo de aspersão térmica escolhido, criando uma camada superficial sob o substrato.

Quando os materiais fundidos ou semifundidos são depositados sob a superfície do substrato, estes se solidificam rapidamente e aderem às irregularidades da superfície preparada formando uma estrutura lamelar, conhecida também como os *splats*, que se apresentam sob a forma de uma panqueca (partículas lenticulares), por exemplo, no caso de uma única partícula depositada[19]. O revestimento é formado pela superposição dos *splats*, que solidificam e se interligam entre si.

Os materiais de revestimento fundidos ou semifundidos depositados no substrato irão resultar na formação do revestimento através de um ou mais dos vários processos de aspersão. Essas variações ocorrem nas ligações mecânicas à medida que as partículas se projetam no substrato e se interligam com as superfícies rugosas do substrato, e também na difusão local do material de revestimento com o substrato e no mecanismo de ligação por meio de forças de Van der Waals [20].

As propriedades físicas dos revestimentos por aspersão térmica, como a porosidade, e a densidade do revestimento, dependem dos parâmetros do processo, tais como: a distribuição do tamanho das gotículas, a velocidade, o grau de solidificação, o material do substrato e a temperatura [21].

O uso da fonte de energia para aquecer e derreter as partículas do revestimento pode ser: a combustão de gás combustível, arco elétrico e arco de plasma. O processo de aspersão térmica pode ser dividido em duas categorias. (i) processos de baixa energia, tais como aspersão à chama e arco, muitas vezes referida como metalização, e (ii) processos de alta energia, tais como aspersão de plasma, pistola de detonação e combustível de oxigénio a alta velocidade [22].

Os revestimentos podem ser aplicados manualmente, semiautomáticos e automáticos dependendo da repetibilidade e precisão do produto final a ser alcançado. Para controlar a formação de óxidos na superfície revestida, os revestimentos podem ser feitos sob ambiente de vácuo. A espessura do revestimento pode variar de 25 μm a 2,5 mm dependendo da utilização desse componente ou sistema de partícula [23].

2.4.1 Processo da Aspersão Térmica

O processo de aspersão térmica é classificado de acordo com a fonte de energia utilizada para aquecer ou fundir os materiais de revestimento e geralmente pode ser dividido em três grupos principais, que são: i) processo de combustão, ii) processo de arco elétrico e iii) processo de plasma.

A Figura 1 mostra os principais processos das três categorias e suas subcategorias. Cada processo de aspersão térmica tem sua própria limitação, vantagens e desvantagens, capacidade e recurso. A escolha do processo de aspersão térmica depende das propriedades mecânicas, das propriedades químicas e da microestrutura das superfícies revestidas [24].

Na seleção do processo térmico a ser usado, precisamos estudar as características do processo de aspersão térmica. Primeiramente, sabendo quais são os melhores parâmetros para esse revestimento em termos de temperatura da chama, velocidade da partícula, tamanho da partícula, morfologia e tipo. A partir, dessas informações será possível escolher o melhor processo de aspersão térmica a ser usado, que desempenhara um papel importante na obtenção dos melhores revestimentos.

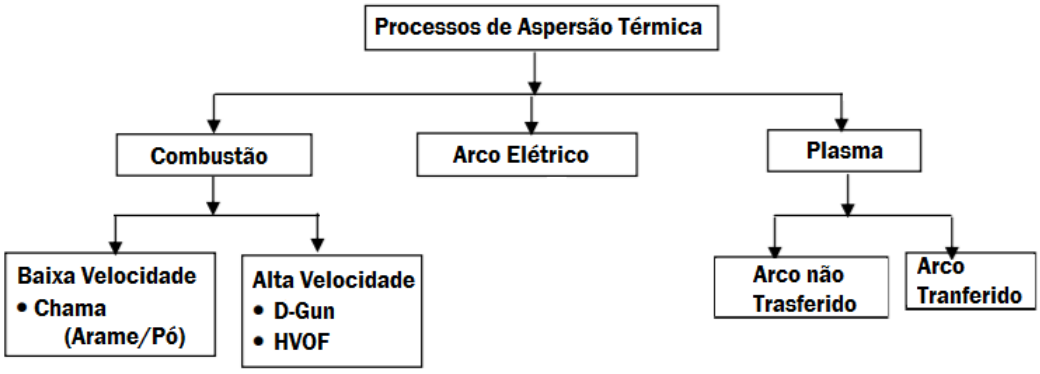


Figura 1 – Os principais processos de Aspersão térmica [21].

O layout no processo de aspersão térmica compreende geralmente os seguintes itens: fornecimento de gás, fornecimento de energia, painel de controle, alimentador de pó /fio, tocha de aspersão e substrato, indicados na Figura 2:

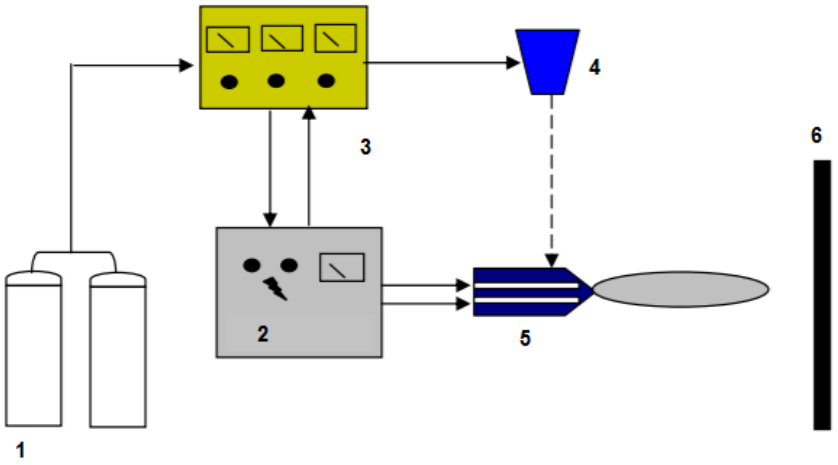


Figura 2 – Layout do processo de aspersão térmica: (1) fornecimento de gás, (2) fornecimento de energia, (3) painel de controle, (4) alimentador de pó / fio, (5) tocha de aspersão e (6) substrato [21].

2.4.1.1 Aspersão Térmica por Arco elétrico – ASP

A aspersão térmica a arco elétrico foi originalmente concebida por M. U. Schoop em 1910, entretanto, apenas começou a ser comercializado na década de 1960 [25]. O processo de aspersão térmica por arco elétrico também conhecido como processo arco arame, pois utiliza o arco elétrico como fonte de calor para fundir o arame de deposição [24].

O aquecimento das partículas é proporcionado por jatos de gás aquecido, que utiliza corrente contínuo, obtida a partir da diferença de potencial adquirida entre dois fios de eletrodos consumíveis, continuamente alimentados em conjuntamente e um arco controlado é gerado quando de sua interseção, e os materiais aplicados têm de ser eletricamente condutores [24].

Com a finalidade de reduzir a oxidação para aplicações especiais, gases inertes podem ser usados para substituir o ar comprimido como, por exemplo, argônio e hélio. A alta temperatura das partículas pode produzir áreas de reação química ou difusão ou ambas, após o impacto com o substrato. Estas interações são similares a pequenas soldas a ponto de conferir ao revestimento excelente resistência à adesão e coesão [24]. O esquema da ASP é mostrado na figura 3.

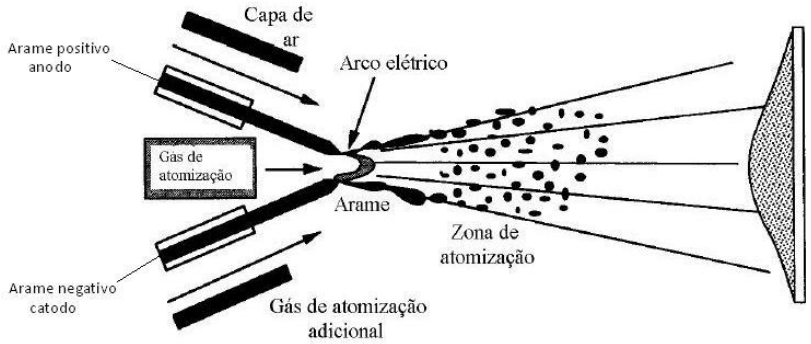


Figura 3 – Esquema de aspersão térmica por arco elétrico [26].

Esse é um processo de média a alta energia que produz uma camada depositada com índices de óxidos inferiores ao processo de aspersão à chama. Onde, aumentando a diferença de potencial entre os arames, aumenta-se o comprimento do arco e o tamanho das gotículas, com a compactação elevada das partículas, alcançando um menor índice de porosidades na camada (camada mais densa). Entretanto, para obtenção de revestimentos densos e de melhor acabamento, a diferença de potência deve permanecer em valores mínimos compatíveis com a estabilidade do arco [24].

A aderência do revestimento obtido por arco elétrico é alta, sendo superior à aderência dos processos à chama de 3 a 4 vezes, levando em consideração que foram depositadas a mesma liga sobre o mesmo substrato nos dois casos. As taxas de deposição são mais altas, se comparado com outros processos, por causa da corrente, velocidade do arame e principalmente devido a utilização de dois arames enquanto que na técnica à chama convencional utiliza somente um arame, tornando assim bastante econômico a aplicação de revestimento em grandes superfícies [24].

A taxa de deposição é controlada por dois fatores únicos que são a corrente elétrica e a taxa de alimentação do arame necessária para esta corrente[27]. Devido às velocidades de partículas mais altas a pistola a arco acaba fornecendo valores maiores de aderência e coesão e menor porosidade em relação à técnica à chama com arame ou pó [24].

As vantagens do processo de ASP são: a facilidade de uso e aprendizado, é portátil e de fácil manutenção. O processo a arco também produz maiores taxas de deposição e, em geral, tem maior coesão interlamelar que os revestimentos por combustão de baixa velocidade. Ele também fornece revestimentos mais espessos e de menores custos operacionais do que por plasma. Outros benefícios são a sua capacidade de altas taxas de pulverização de materiais, substratos relativamente frios e os custos de consumo inferior ao de outros processos [28].

A desvantagem do processo a arco é que os revestimentos têm tipicamente altos níveis de porosidade, óxidos e partículas não fundidas. Os revestimentos são geralmente mais espessos do que em outros processos, mas podem ser controlados [28]

Outras características do processo ASP são listadas abaixo [23] [28]:

- ✓ Porosidade: 10 – 20%;
- ✓ Diâmetros típicos dos arames: 1,6 – 5 mm;
- ✓ Potência elétrica: 5 – 10 KW;
- ✓ Temperatura do arco: 5800 ºC a 280 A de corrente;
- ✓ Velocidade da partícula: 150 m/s
- ✓ Tensão: 20 – 40 Volts;
- ✓ Distância de aspersão: 50 – 170 mm;
- ✓ Pressão do gás de atomização: 0,2 – 0,7 MPa;
- ✓ Fluxo do gás atomizado: 20 – 1300 l/h
- ✓ Vazão de gás atomizado: 1 – 80 m^3/h;
- ✓ Aderência da camada: 10 – 30 MPa (Zn e Al), 70 MPa (ligas NiAl);
- ✓ Espessuras típicas depositadas: 100 – 2000 μm (0,1 – 1,5 mm);
- ✓ Ângulo de aspersão: melhores resultados a 90 °C;
- ✓ Taxa de deposição: 3 – 18 kg/h.

2.4.2 Comparando os processos de Aspersão Térmica

A classificação dos processos de aspersão térmica se divide em dois grupos: um que usa a combustão e outro que utiliza a energia elétrica como fonte de energia. E de cada processo de aspersão térmica é possível extrair as principais características sejam elas positivas ou negativas e comparar essas informações como auxílio na escolha do tipo de processo de aspersão térmica adequada [24].

Na Tabela 1 são apresentadas comparações entre os principais parâmetros entre alguns tipos de Aspersão Térmica.

Tabela 1 - Comparativo entre os principais parâmetros entre alguns tipos de processos de aspersão térmica [29].

Característica → ***Processo ↓***	**Vazão de gases (m3/h)**	**Temperatura média (°C)**	**Atmosfera em torno da gotícula**	**Velocidade de impacto (m/s)**	**Aderência relativa (1 a 10)**	**Coesão interlamelar**	**Teor de óxidos (%)**	**Custo relativo (1 a 10)**	**Taxa de deposição máxima (kg/h)**	**Potência (kW)**	**Energia para fusão (kW/kg)**
Chama (Pó)	11	2200	CO,CO2,H2 0	30	3	Baixa	6	3	7	25 - 75	11 - 22
Chama (Arame)	71	2800	N2,CO,CO2, H2O	180	4	Média	4	3	9	50 - 100	11 - 22
Arco (Arame)	71	5500	N2,O2	240	6	Alta	0,5 - 3	1	16	4 - 6	0,2 - 0,4
Plasma	4,2	5500	N2,Ar,H2,O2	240	6	Alta	0,5 - 1	5	5	30 - 80	13 - 22
Detonação	11	3900	N2,CO,CO2, H2O	910	8	Muito Alta	0,1	10	1	100 - 270	220
HVOF	28 - 57	3100	N2,CO,CO2, H2O	610 - 1060	8	Muito Alta	0,2	5	14	100 - 270	22 - 200
Plasma de alta energia	17 - 28	8300	N2,Ar,H2,O2	240 - 1220	8	Muito Alta	0,1	4	23	100 - 250	9 - 13
Plasma a vácuo	8,4	8300	Ar,He	240 - 610	9	Muito Alta	ppm	10	10	50 - 100	11 - 22

2.5 Características dos revestimentos depositados por Aspersão Térmica

As características dos revestimentos metálicos depositados pelos processos de aspersão apresentam diferentes propriedades, que estão associadas e dependem do tipo de processo escolhido e do procedimento de aplicação utilizado [30].

Os revestimentos são formados por sucessivas camadas de gotículas líquidas ou parcialmente liquidas que ao serem aspergidas na superfície se achatam e solidificam sob o substrato formando lamelas mais conhecidas como *Splats.* Uma estrutura típica de revestimento apresenta lamelas entremeadas de inclusões de óxidos, microtrincas, partículas sólidas e porosidades e quanto maior ou menor a quantidade desses defeitos maior será a influência dela nas propriedades do revestimento e consequentemente na sua qualidade [30].

A Figura 4 apresenta a estrutura típica de um revestimento depositado por aspersão térmica, com os principais defeitos indicados.

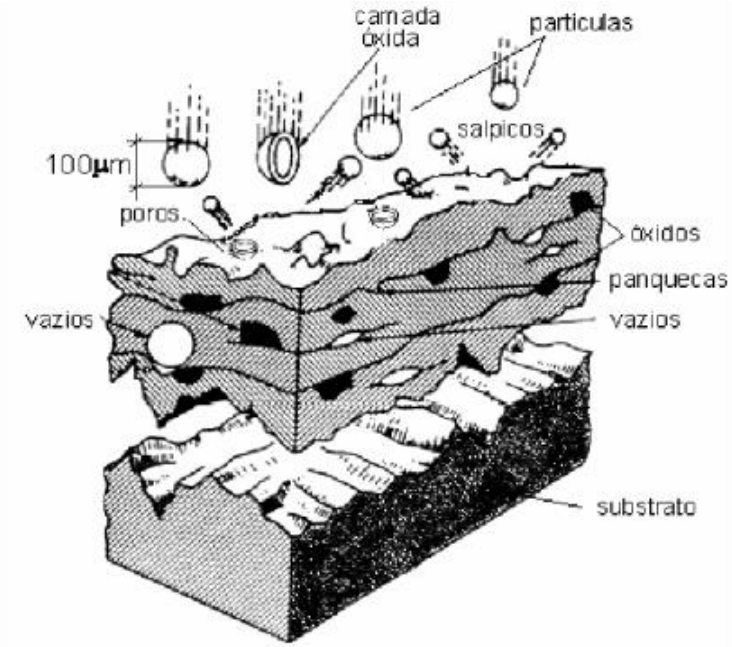


Figura 4 - Estrutura típica de um revestimento depositado por aspersão térmica [49].

Durante o processo de aspersão térmica o jato produz partículas com uma distribuição de velocidades e temperaturas, que variam de forma irregular fazendo com que as partículas adquiram formas distintas e fases líquidas ou parcialmente liquidas e isso acaba por influenciar na qualidade das partículas aspergidas sob o substrato ou sob o próprio revestimento, tornando-os frágeis e passíveis da presença de defeitos [31].

Por isso, as características dos revestimentos são tão importantes e necessárias para avaliar e quantificar os revestimentos, além do processo de aspersão térmica escolhido, que envolvem diversos parâmetros de aspersão (material do revestimento, distribuição dos tamanhos de partículas a serem aspergidas, velocidade de solidificação, velocidade do fluxo, pressão e tipo de gás), e que variam na sua metodologia de deposição sendo necessária a sua otimização [32].

Além das características do substrato, que também influenciam diretamente na qualidade do revestimento como material, temperatura, rugosidade e limpeza, que garantem que a maioria das partículas aspergidas seja fundida no momento do jateamento e assim diminuindo a formação de defeitos [32].

As principais propriedades e características dos revestimentos serão citadas e comentadas, nos próximos itens, abaixo:

2.5.1 Aderência

A aderência é uma propriedade muito importante no processo de aspersão térmica e é responsável por influenciar na resistência entre a camada de revestimento aspergida e o substrato [33]. Porque, de nada adianta ter um revestimento com uma camada com espessura ideal, mas se a mesma não tiver aderência suficiente, isto influenciará negativamente no desempenho e na qualidade do revestimento [34].

A aderência adequada de um revestimento por aspersão térmica depende principalmente de sua adesão ao substrato, assim como a coesão entre as partículas aspergidas. A análise da aderência está associada a três mecanismos que são: mecânico, químico - metalúrgica e física. A interação mecânica ocorre na contração e no resfriamento das partículas aquecidas e aspergidas sob o substrato. A interação metalúrgica está relacionada à natureza do material do revestimento e do calor transferido pela partícula no substrato, que provoca um maior ou menor nível de microssoldagem. Já a interação física é responsável pela aderência propriamente dita entres os átomos e as forças de Van der Waals [33, 35,36].

Uma série de fatores impedem que exista uma coesão perfeita em toda a superfície entre as lamelas e o substrato, dentre esses fatores pode-se destacar a presença de óxidos, impurezas, porosidades (tamanho e morfologia dos poros), a resistência coesiva entre as lamelas, a presença de trincas e a microestrutura das lamelas [31]. A forma como as partículas atingem a superfície a ser revestida vai impactar na presença de uma maior ou menor área de contato as chamadas “regiões de microssoldagem” ou “zonas ativas” entres as lamelas, e que ocorrem efetivamente entre 20% a 30% das superfícies das lamelas [37].

A resistência de um revestimento é medida, em geral, como a força necessária capaz de separar o revestimento do substrato. Um dos métodos para se avaliar a aderência de um revestimento aplicado por AT é o ensaio de aderência (“*Pull-off* ”).

O ensaio de aderência consiste em colar um pino com um adesivo sob a superfície do revestimento e aplicar uma tensão de tração crescente perpendicular capaz de desprender esse pino da superfície gerando uma falha que pode ser do tipo adesiva ou do tipo coesiva. O item 3.4 Ensaio de Aderência detalhará este tipo de ensaio [38].

A Figura 5 mostra um esquema simplificado do Ensaio de Aderência:

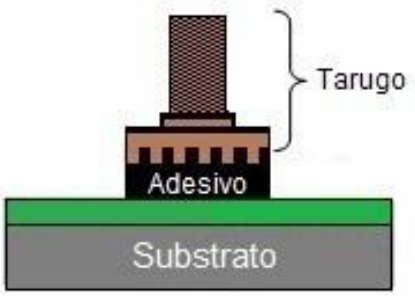


Figura 5 – Esquema simplificado do Ensaio de Aderência (“Pull - off ”) [28].

Os principais tipos de falha de revestimento são as trincas e o descolamento do revestimento do substrato, portanto, para obter um melhor resultado de aderência do revestimento com o substrato é importante realizar um tratamento prévio da superfície do substrato e reduzir a quantidade de óxidos, impurezas e poros [38].

Segundo Zaat [40], a distância da tocha até o substrato a ser revestido e o tipo do processo de aspersão térmica utilizada influencia na adesão [40]. Assim como os estudos realizados por Pershin *et. al.* [41] mostram que o pré-aquecimento do substrato aumenta a adesão do mesmo com o revestimento [41]. De acordo, com Paredes [42] o pré-aquecimento do substrato auxilia também na limpeza final da superfície e na redução das tensões internas melhorando a aderência do revestimento [42].

Em revestimentos mais espessos, as tensões internas provenientes da contração de solidificação no resfriamento são maiores, contribuindo para a perda de aderência, que pode levar ao descolamento do revestimento [23].

Quanto à morfologia das partículas aspergidas pelo processo de AT, estudos realizados por Sobolev *et al.* [43] mostraram que a pressão de impacto das partículas fundidas influencia diretamente na aderência entre o substrato e o revestimento. Quanto maior o raio da partícula fundida aspergida maior será a microadesão do revestimento no substrato [43].

2.5.2 Porosidade

A porosidade é a propriedade mais conhecida nos revestimentos obtidos por aspersão térmica, que é caracterizada pela formação de vazios isolados e/ou vazios interconectados, gerados pelo empilhamento das partículas aspergidas, na forma achatada, que permitem a presença de líquidos ou até que gases penetrem até o substrato, ou de vazios que podem ocorrer também entre o substrato e o revestimento acelerando o desgaste do revestimento [44,45].

A presença de porosidades é responsável pela propagação de microtrincas, que causam na estrutura do revestimento a deterioração das propriedades mecânicas, como por exemplo, condutividade térmica, elétrica e o módulo de elasticidade e isso se concretiza na diminuição da área transversal efetiva do revestimento, prejudicando também a aderência do revestimento [24, 46].

Os revestimentos realizados por AT podem apresentar porosidade de até 20%. A Tabela 2 apresenta o comparativo dos diversos processos de aspersão térmica com seus respectivos percentuais de porosidade [23, 24,30]:

Tabela 2 - Comparativo dos percentuais de porosidade e dos parâmetros relevantes dos processos de aspersão térmica [23,30]

Processo → ***Parâmetros↓***	***FS [pó]***	***FS [arame]***	***ASP [arame]***
Temperatura Chama/Arco [°C]	2200 - 3200	2800 - 3200	4000 - 6000
Veloc. Transferência [m/s]	30 -150	100 - 250	100 - 250
Atmosfera da Chama/Arco	CO - CO2 - H20	N2 - CO - CO2 - H20	N2 - O2
Teor de Óxidos [%]	0,4 - 10		2,5 - 15
Porosidade [%]	5 - 15		3 - 15
Aderência [MPa]	4 - 20		10 a 36

Durante o processo de AT, os principais fatores que influenciam na formação e na quantidade da porosidade são: o gás de arraste utilizado, a distância da tocha ao substrato, o ângulo de aspersão, o pré-aquecimento do substrato, o material utilizado como revestimento, as partículas sólidas ou não fundidas, as condições de aspersão e a preparação da superfície [46]. Portanto, existe um entendimento que selecionando os parâmetros de aspersão térmica apropriadamente a quantidade de porosidade seria controlada e assim reduzida [26,45].

Outra maneira de reduzir a quantidade da porosidade é através da aplicação de selantes sobre a superfície do revestimento, após o processo de aspersão térmica protegendo a superfície, vedando e cobrindo a existência de possíveis poros abertos. A vedação dos poros influência na redução da área exposta e consequentemente minimiza a corrosão [45].

Os poros podem ser classificados levando-se em conta a localização dos poros em relação à superfície do revestimento e a interface entre o substrato e o revestimento. Desta forma, podem-se distinguir três tipos [23]:

- **Porosidade aberta**, que corresponde a todos os poros conectados com a superfície do revestimento. É considerado o pior tipo de porosidade porque pode expor o substrato ao ambiente externo.
- **Porosidade semiaberta**, que corresponde a todos os poros expostos à superfície, mas que, apesar disto, não atingem o substrato.
- **Porosidade fechada**, que descreve todos os poros no interior do revestimento. Não apresenta riscos, pois não expõe o substrato ao ambiente externo.

Segundo os estudos de Vreijling [44], foram classificados sete tipos de porosidades, que ocorrem em revestimentos produzidos por aspersão térmica, que serão apresentadas na Figura 6:

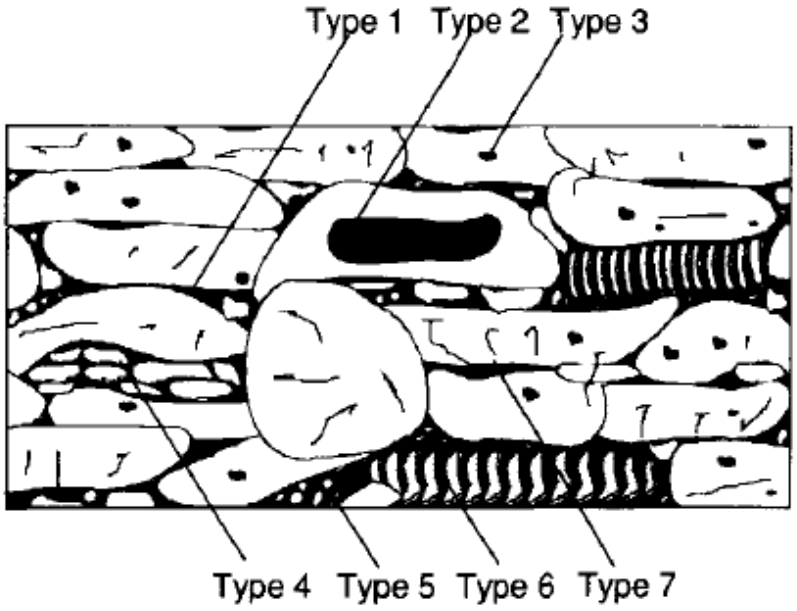


Figura 6 - Esquema simplificado dos sete tipos de porosidades encontrados em revestimentos por aspersão térmica [44].

- **Tipo 1**: Porosidade interlamelar que é causada pelo empilhamento de partículas separadas. A quantidade e o tamanho da partícula aspergida estão relacionados diretamente a distribuição do material aspergido.
- **Tipo 2**: Porosidade formada por bolsas de gás preso que são causadas pela turbulência do fluxo de gás durante o processo de aspersão.
- **Tipo 3**: Porosidade na forma de bolhas de gás, que são causadas pela dissolução do gás no metal fundido que se desenvolveram com o resfriamento do metal.
- **Tipo 4**: Porosidade causada pela desintegração das partículas sólidas durante o impacto no processo de deposição.
- **Tipo 5**: Porosidade causada pela condensação de partículas parcialmente evaporadas, e este tipo de porosidade normalmente costuma conter resíduos de pó.
- **Tipo 6**: Porosidade causada pela formação de dendritos de contração de solidificação das partículas, e essa morfologia altamente texturizada costuma causar uma ruptura na estrutura do revestimento.
- **Tipo 7**: Porosidade que causa micro trincas, independentemente de sua origem de formação.

Para identificar o percentual de porosidade presente nos revestimentos de uma determinada amostra, por exemplo, é necessário que essa quantificação da porosidade seja inicialmente realizada através da microscopia óptica e/ou de varredura, e depois realizar o processamento dessas imagens com o auxílio de algum software de análise de imagens, como , por exemplo, Fiji – ImageJ , Image Tool, Image-Pro e Material Extensions etc...[45].

A existência de porosidades em um revestimento nem sempre é prejudicial, apesar de na maioria das vezes causarem diminuição da aderência entre o revestimento e o substrato e diminuição da resistência à corrosão. No caso dos revestimentos usados como barreira térmica (TBC: Thermal Barrier Coatings) que são compostos de óxidos cerâmicos, o alto percentual de porosidade em torno de 8% a 15% é responsável por aumentar ainda mais a capacidade isolante e por aumentar a resistência à choques térmicos e as variações de ciclos de temperatura[45].

2.5.3 Óxidos

Durante o processo de AT, a formação de óxidos está correlacionada com a atmosfera gerada pelas partículas aspergidas, que por fim são depositadas e estão fundidas ou semifundidas. O contato das partículas aquecidas com o ar ambiente faz com que as partículas fiquem cobertas por filmes/ películas de óxidos. Dependendo do aquecimento das partículas na pistola, grau de fusão, velocidade de resfriamento e da deposição do substrato podem gerar diferentes gradientes de oxidação e ativação térmica [24].

A presença de óxido é prejudicial para a maioria dos materiais aspergidos, porque prejudica a coesão entre as lamelas, à aderência ao substrato, e consequentemente resulta na corrosão [47]. Nos revestimentos, essas inclusões de óxidos aumentam tanto a dureza do revestimento a ponto de gerar revestimentos frágeis, pois os óxidos fraturam facilmente. Porém, em alguns casos a inclusão de óxidos é utilizada para aumentar a resistência ao desgaste e diminuir a condutividade térmica [26]. Por isso, é importante controlar a formação de óxidos durante o processo de AT visando obter uma microestrutura do revestimento de qualidade [48].

Por intermédio da microscopia ótica, observa-se que os óxidos se apresentam nos revestimentos como fases escuras e alongadas e podem ser vistos na seção transversal do revestimento, paralelas ao substrato [26]. Pois, quando as partículas aspergidas impactam no substrato ou sob as lamelas já formadas de revestimento, o filme de óxido que envolvia a partícula se rompe e ele passa a se tornar parte da deposição misturada com as partículas fundidas e semifundidas e espalhadas entre as camadas do revestimento [45, 42].

Dos processos de aspersão térmica, os revestimentos obtidos por HVOF (High Velocity Oxigen Fuel) foram os que apresentaram os menores percentuais de oxidação se comparados com os resultados obtidos por arco elétrico, por exemplo, que possuem uma considerável quantidade de poros e óxidos interlamelares. Isso acontece porque o processo de HVOF envolve temperaturas inferiores e maiores velocidades das partículas [48,49]. A Tabela 3, apresenta o comparativo dos diversos processos de aspersão térmica com seus respectivos percentuais de oxidação [30].

Tabela 3 - Comparativo dos percentuais de óxidos nas camadas de Al de cada processo de aspersão térmica [23,30].

Condição de Aspersão térmica	**Teor de óxido de Al (camada ~ 300um)**
Processo a chama FS	1,30%
Processo Arco ASP	6,80%
Processo a chama HVOF	7,70%

As inclusões de óxidos podem ser minimizadas através de algumas modificações nos parâmetros do processo de AT, como na remoção de ambiente reativo (com a utilização de câmaras de gases inertes), redução das temperaturas média das partículas (diminuindo o poder calorífico dos jatos de aspersão), redução da temperatura na superfície do substrato e revestimento usando jatos de ar ou aumentando a sua velocidade de aspersão.

Na utilização de partículas de pó com tamanho adequado, o tamanho elevado ajuda a minimizar a quantidade total de óxidos. A distância entre a pistola e o substrato é um fator importante, pois influência na qualidade do revestimento. Pistolas automatizadas evitariam a oxidação em movimento, perda de energia cinética e a temperatura das partículas no impacto [26, 50, 45]. A utilização da mistura entre metano e ar promete reduzir a concentração de óxidos [51].

2.5.4 Microtrincas

Normalmente as microtrincas são encontradas em revestimentos aspergidos e são formadas devido ao resfriamento da camada do revestimento, o que causa o acúmulo de tensão residual e uma microestrutura susceptível a propagação das microtrincas [42,52]. Sendo indesejáveis nos revestimentos metálicos, entretanto, nos revestimentos cerâmicos são aceitáveis, pois apresentam uma fina camada de trincas perpendiculares ao plano das lamelas e permitindo a deformação sob as tensões térmicas e elevando dessa forma a tolerância de deformação e a resistência à fadiga [53,46].

2.5.5 Partículas não fundidas de Microestrutura Esferoidizada

Durante o processo de aspersão térmica, a fundição das partículas aspergidas não ocorrer de maneira desejada e como consequência serão formadas partículas não fundidas com formato esferoidizado. Isso acontece devido as pequenas modificações nos parâmetros que influenciam no processo de AT, como a velocidade de impacto, temperatura de fundição, temperatura de resfriamento, posição do operador da aspersão, entre outros fatores. Este tipo de microestrutura formada fragiliza o revestimento, pois a estrutura esferoidizada é mais propensa à propagação de trincas do que uma estrutura lamelar [42,46, 53].

2.5.6 Pós-tratamento dos Revestimentos

Após a aspersão térmica ter sido realizada é comum a utilização de revestimentos orgânicos (selantes e/ou esquemas de pintura) a fim de vedar e fechar as porosidades que porventura são inerentes desse processo protegendo o revestimento e consequentemente o substrato de sofrer corrosão. A importância desse pós-tratamento é que se o revestimento for utilizando em ambientes corrosivos, esta vedação dos poros irá reduzir a área exposta e assim minimizará a corrosão [24,45].

Por isso a selagem é utilizada como pós-tratamento com o intuito de reduzir os níveis de porosidades nos revestimentos metálicos que podem apresentar porosidades abaixo de 1%, mas em média os valores estão em torno de 1% a 15% [24]. Em geral a função dos selantes é de prolongar o efeito de proteção do revestimento metálico, protegendo-a contra incrustações de sujeira ou penetração de umidade ou agente corrosivo nos poros, assim como na rugosidade superficial da camada [31, 26].

A utilização dos selantes como pós-tratamento dos revestimentos metálicos produzidos por AT, apresentam algumas vantagens [54,45]:

- A penetração do selante nos poros presentes no revestimento reduz à área total da superfície exposta a corrosão;
- A superfície fica com textura menos rugosa e não retém sujeiras e outros contaminantes, permanecendo mais limpa;
- O revestimento selado não precisa de pinturas adicionais, visto que o selante oferece a proteção necessária.

As propriedades e características que estão diretamente ligadas ao bom desempenho do selante são[55]:

- Baixa viscosidade;
- Baixa razão de sólidos por volume;
- Pode conter pigmentos ou não, mas se tiver pigmentos, eles devem ser pequenos para não impedir o bom escoamento nos poros;
- Deve existir uma compatibilidade entre o pigmento e o metal de aspersão;
- Deve absorver pouca água para resistir à umidade;

- Deve ser compatível com o ambiente de trabalho;
- Deve possuir baixa espessura de no máximo 75μm;

3 Metodologia experimental

Este Capítulo foi destinado a detalhar os procedimentos experimentais realizados no substrato de aço SAE 1020 revestido pelo Processo de Aspersão Térmica a Arco Elétrico, com revestimentos de liga de Níquel – Cromo e Cobalto – Cromo e diferentes tipos de selantes[56].

Os experimentos foram realizados em cinco amostras para que pudessem ter uma quantidade relevante de resultados e para compará-las com os resultados obtidos deste trabalho, trabalhos anteriores e com a literatura. Os itens a seguir detalham os seguintes experimentos realizados que são: Microscopia Óptica (MO), Ensaio de Aderência, Processamento Digital de Imagem (PDI) e Ensaio de Microdureza Vickers.

3.1 Materiais e Procedimento

O material utilizado como substrato foi o aço carbono SAE 1020 por ser um dos aços mais utilizados devido a sua alta tenacidade, baixa dureza, fácil usinagem e excelente forjabilidade e soldabilidade, sendo soldável por qualquer processo a gás, arco ou resistência, cuja composição química encontra-se indicada na Tabela 4 [56]. As amostras, e todas as informações referentes a composição química dos arames e substrato, propriedades físicas dos arames, especificações das placas, tipos de selantes usados e características do processo de AT por Arco elétrico foram feitos de acordo com dados experimentais anteriores[56].

Tabela 4 – Composição química do Substrato utilizado no Processo AT a Arco Elétrico das placas e eixos [56].

	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
Substrato	0,18 - 0,23	0,3 – 0,6	0,04	0,05

O processo de aspersão térmica utilizado para o revestimento nas placas e cilindros usados nas amostras foi o arco elétrico, utilizando dois arames de composições diferentes, que foram fundidos, exceto o arame IV. Portanto a composição química dos arames que se fundiram, está indicada na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição química dos arames. (Valores >0.01% não foram apresentados) [56].

Arame	Fe (%)	Co (%)	Cr (%)	Ni (%)	B (%)	Mn (%)	W (%)	Mo (%)	C (%)	Si (%)
I	66,10	-	27,00	-	3,50	1,80	-	-	-	1,60
II	65,70	-	25,70	2,90	-	1,90	-	0,80	1,60	1,40
III	3,60	58,4	28,80	1,90	-	0,90	4,90	0,02	1,10	0,30
IV	≥85,55	-	12-14	1,00	-	1,00	-	-	0,30	0,08

A combinação dos arames utilizada para formar o revestimento e sua resultante, pode ser observada na Tabela 6.

Tabela 6 - Combinação dos arames e o revestimento resultante para cada condição [56]

Condição	Combinação dos arames	Revestimento
1	I e III	Liga de cobalto-cromo
2	I e II	Liga de níquel-cromo
3	IV	Liga de níquel-cromo

Inicialmente, as amostras passaram por uma limpeza mecânica em seguida os revestimentos provenientes das combinações dos arames foram depositados em chapas de aço carbono SAE 1020, em somente um lado de cada chapa, com uma espessura de revestimento em torno de 2 mm. Foi aplicada uma resina protetora (na cor azul) nas laterais da chapa e se necessário poderia aplica-la também no lado que não foi aspergido, para evitar a oxidação.

A partir das composições químicas e físicas dos arames utilizados para o revestimento essas informações serviram de base para controlar os parâmetros envolvidos no processo de aspersão térmica, para que o revestimento mantivesse as propriedades físicas próximas à do arame, como pode ser observada na Tabela 7:

Tabela 7 – Propriedades físicas dos arames [56].

Propriedades Físicas	
Diâmetro	1,6 mm
Eficiência no depósito	78%
Ponto de fusão	1427ºC
Resistência de Cisalhamento	32.6MPa
Texturização	0,15 – 0,4 μm(6 - 15 μin)
Dureza	R_{15n} 80-82 (R_c 40-43)
Densidade	6,74kg/m^3
Coeficiente de Expansão Térmica	17,4 x 10-6 °C-1

3.2 Preparação das amostras

Inicialmente, as amostras foram cortadas, no sentido transversal, na máquina de corte AROTEC modelo COR-80 do LAMAT (Laboratório de Metalografia do CEFET/RJ), utilizando discos com dureza na faixa de 35 a 50 HRc, e um lubrificante a fim evitar o aquecimento excessivo dos corpos de prova.

Os corpos de prova obtidos possuem as seguintes configurações:

- ✓ Amostras cilíndricas e retangulares;
- ✓ Substrato de aço carbono SAE 1020;
- ✓ Placa de 100 mm x 150 mm x 4,5 mm;
- ✓ Eixo de 120 mm x 63,80 mm;
- ✓ Selante (resina epóxi) na metade de todas as amostras;
- ✓ Aplicação de resina protetora nos contornos das chapas.
- ✓ Amostras numeradas.

A Figura 7 apresenta a placa e o eixo utilizados para gerar as amostras, após aplicação do revestimento, selante e a resina protetora.

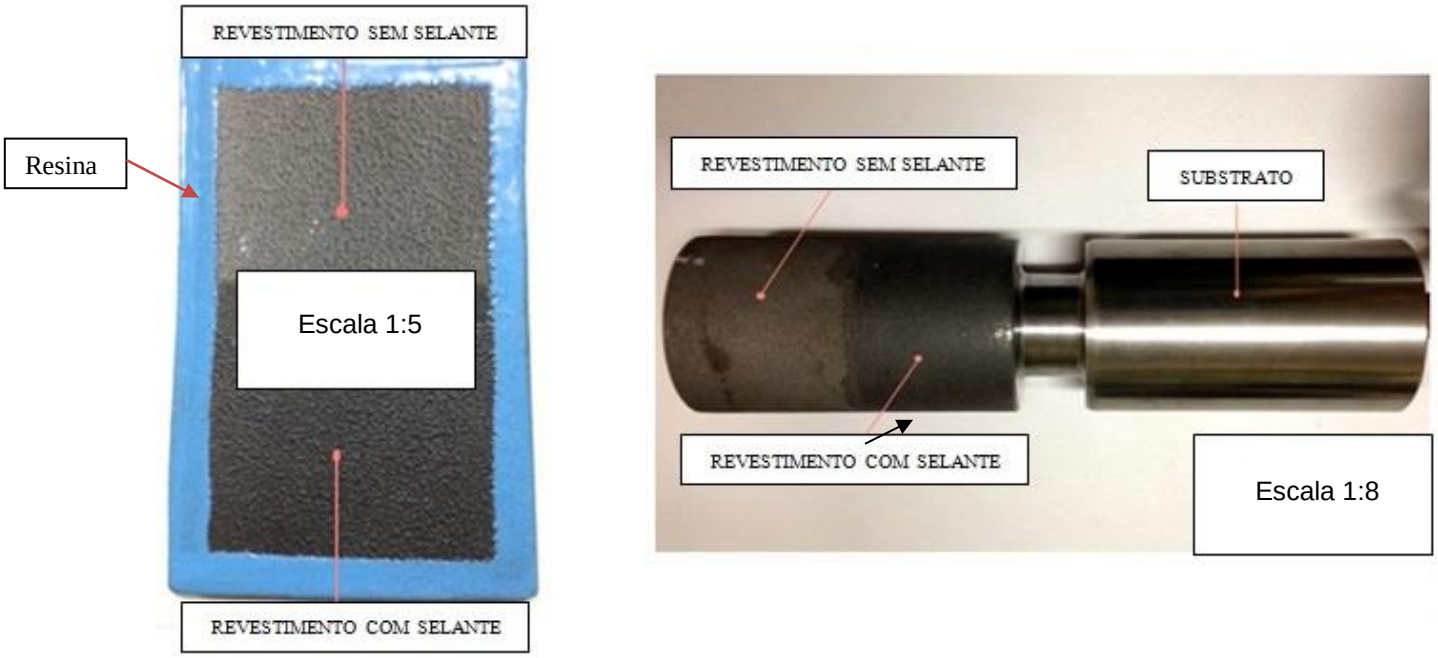


Figura 7 - Aplicação parcial do selante após revestimento na placa e no eixo

A função do selante é aumentar a resistência à corrosão do revestimento e diminuir a densidade de defeitos como, por exemplo , porosidades, e isso ocorre através da influência das suas propriedades e pela sua capacidade de penetração na camada de revestimento. De tal forma que, quanto maior for a penetração do selante, consequentemente menor será o percentual de defeitos no revestimento com o preenchimento dos poros pelo selante.

A Tabela 8 apresenta as propriedades dos selantes utilizados neste trabalho [56].

Tabela 8 – Propriedades dos selantes [56].

Selante	Composição		Características Físicas e Químicas
EPÓXI (Fabricante: Araldite)	Resina: Resina epóxi. Endurecedor: N, N Dimetildipropilenotriamina, Trietilenotetramina.		Aparência visual: Líquido incolor a amarelado (Resina) /Líquido claro (Endurecedor) Tempo de secagem inicial: 90 minutos Tempo de cura total: 24 horas Temperatura de aplicação: + 5 a 35°C Temperatura de trabalho: - 30 a 80°C Resistência ao cisalhamento (Kgf/cm2): ≥120
Selante S1	Tinta em dois componentes, a base de resina epóxi curada com poliamida.		Massa Específica a 25C: 1,45 g/cm3 Sólidos por volume: 51% Ponto de fulgor: 26°C Aspecto da película: semibrilhante
Selante S2	**Caracterização Química**	Copolímero em meios solventes orgânicos	Pressão do vapor: 233 mbar Densidade: 0,85 g/cm^3 Ponto de ebulição: 56 °C Parcialmente solúvel em água Conteúdo de material solvente: 91 Viscosidade: 13 s (4 mm) Temperatura de inflamação: 460C
	Componentes perigosos	Butanona: 19,5% Etila acetato: 27,5% Acetona: 44%	

A nomenclatura das amostras foi criada com o intuito simplificar o entendimento e facilitar a identificação da forma geométrica, tipo de revestimento e tipo de selante de cada uma das amostras utilizadas, no decorrer deste trabalho.

Número da Amostra. **Forma geométrica da amostra** – **Tipo de Revestimento. Selante utilizado**

Nomenclatura utilizada:

A → Amostra
Epo → Epóxi
Cre → S1 - Resina Epóxi Curada
Dic → S2 - Copolímero

Por exemplo:

A5.P – CoNi.Epo

Onde:

Número da Amostra: A5 (Amostra 5)
Forma geométrica da amostra: P (Placa)
Tipo de Revestimento: Co.Ni (Liga de Cobalto e Níquel)
Selante utilizado: Epo (Epóxi)

Nas Tabelas 9 e 10 estão às informações detalhadas a respeito das amostras e seus tipos de revestimento e selantes. Onde, o selante foi aplicado nas placas parcialmente.

Tabela 9 – Detalhe das condições estudadas nas placas [57].

Placa	Revestimento	Selante
A1.P – CoCr.Epo	Condição 1	Com Epóxi (Fabricante: Araldite)
		Sem epóxi
A2.P – NiCr.Epo	Condição 2	Com Epóxi (Fabricante: Araldite)
		Sem epóxi

Já nas amostras o selante foi aplicado em quase toda a região analisada, e pela combinação dos arames, temos as seguintes condições demostradas na Tabela 10:

Tabela 10 – Detalhe das condições estudadas das amostras [56]

Amostra	Tipo	Revestimento	Selante
A1.E – NiCr.Dic	Eixo	Condição 3	S2
A1.P – NiCr.Dic	Placa		S2
A4.E – NiCr.Cre	Eixo		S1

3.3 Microscopia Óptica

Primeiramente, foi feita uma avaliação microestrutural do revestimento e a identificação das regiões presentes nas amostras, utilizando o microscópio óptico da OLYMPUS, modelo BX 60 MF, localizado no Laboratório de Materiais (LAMAT) do CEFET/RJ.

As amostras utilizadas a partir dos eixos e placas revestidos estão indicadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Amostras fabricadas no LAMAT [56]

AMOSTRA	ORIGEM	SELANTE	IMAGEM	REVESTIMENTO
A1.E – NiCr.Dic	Eixo – 1	S2		Liga de níquel-cromo
A1.P – NiCr.Dic	Placa – 6	S2		
A4.E – NiCr.Cre	Eixo – 4	S1		

3.4 Ensaio de Aderência

O ensaio de aderência por tração, também conhecido como *Pull-Off*, foi realizado no Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello (Cenpes/Petrobras). Foram utilizadas duas chapas que foram denominadas como placa A1.P – CoCr.Epo e placa A2.P – NiCr.Epo. Na placa A1.P – CoCr.Epo foi usada uma liga de CoCr e na placa A2.P – NiCr.Epo NiCr.

O método conhecido por *pull-off* é um dos mais utilizados para medir a aderência de revestimentos, que consiste em colar um pino metálico (carretel) à superfície do revestimento e aplicar uma força trativa para arrancá-lo, vide Figura 8.O resultado do ensaio se dá em função da força aplicada e do tipo de falha que é gerado, sendo dividido em dois tipos: falha coesiva e falha adesiva [24] [58]. O ensaio de aderência foi realizado de acordo com a norma ASTM D4541 [59].

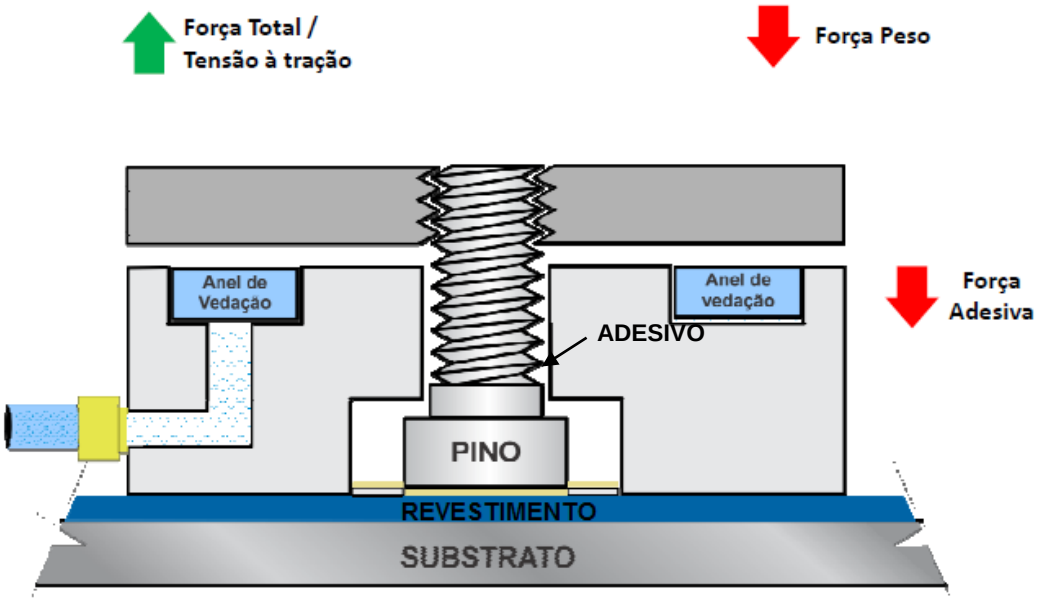


Figura 8 - Desenho esquemático do Ensaio de Aderência (Pull – Off) [24].

O ensaio foi realizado utilizando um medidor de aderência Pneumático da marca PATTI 110, fabricante SEMicro (número de série IM1010-1), Figura 9.

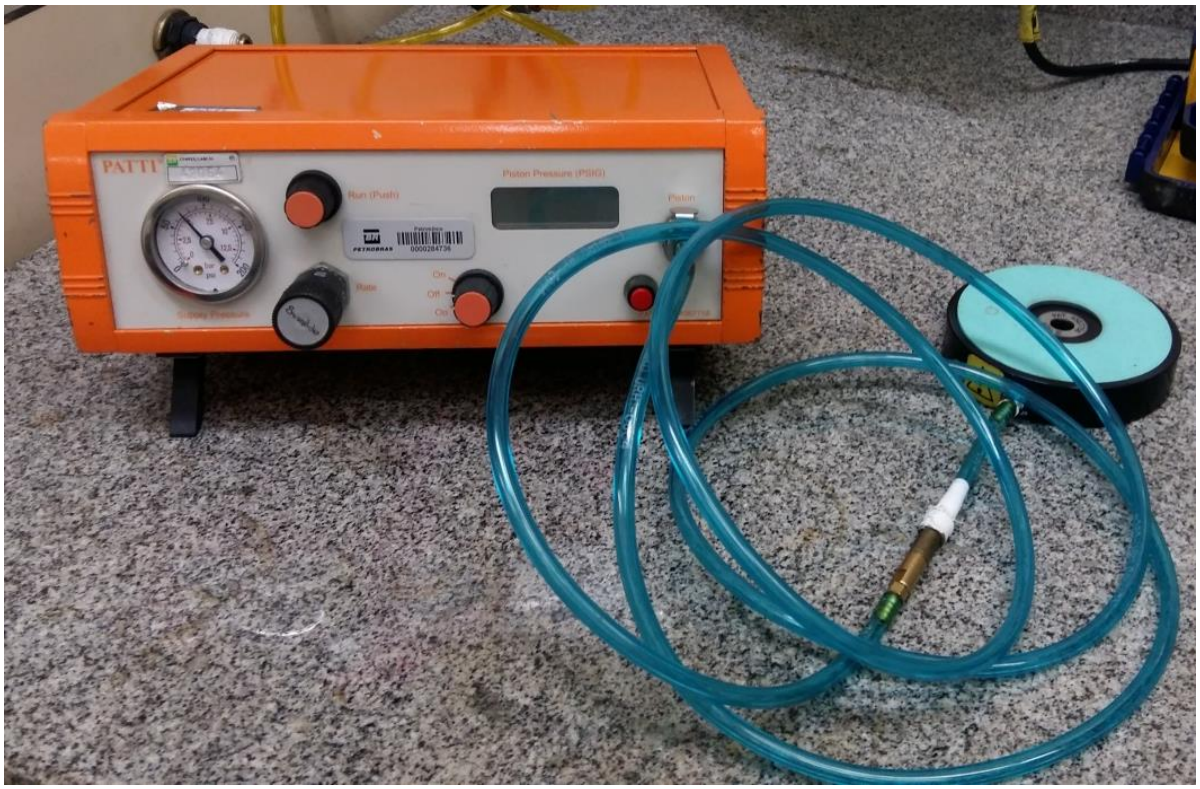


Figura 9 – Equipamento utilizado no Ensaio de Aderência – Pull – Off.

Cada pistão fornece uma carga específica de tração, e a mais indicada para este caso foi o pistão F8 que aplica uma carga de tração de até 28 MPa, que é obtida na unidade de PSIG e foram convertidas para MPa, baseadas no manual da empresa PATTI. Os Dollys/Pinos de 15 mm foram colados no revestimento com adesivo epóxi da marca Araldite, fabricante Brascola, com tempo de secagem de 2 minutos e cura de 24 horas.

O ensaio foi realizado mais de uma vez na mesma placa, mas em localizações e estados diferentes. No primeiro ensaio realizado, um pino foi colado em cada lado da placa, um no lado com selante e outro no sem selante e o revestimento não teve polimento.

Já na segunda vez que o ensaio foi realizado, um pino foi colado apenas no lado sem selante das placas A1.P – CoCr.Epo e A2.P – NiCr.Epo, modificando a sua posição e foi realizado um polimento com uma lixa número 100, no lado sem selante do revestimento para uniformizar a superfície e aplicar uma quantidade menor de adesivo. Portanto, foram obtidos um total de 6 resultados, que serão dispostos na Tabela 12.

Tabela 12 – Detalhe das condições estudadas no Ensaio de Aderência – Pull – Off.

Amostra	Lado da placa	Selante	Pino	Localização	Estados
A1.P – CoCr.Epo	A – Com selante	Adesivo epóxi (Marca: Aradilte)	Pino A	Centralizado	Sem polimento
	B – Sem selante		Pino B_1	Próximo do selante	Com polimento
			Pino B	Centralizado	Sem polimento
A2.P – NiCr.Epo	C – Sem selante		Pino C	Centralizado	Sem polimento
			Pino C_1	Próximo do selante	Com polimento
	D – Com selante		Pino D	Centralizado	Sem polimento

O tempo de cura é de no mínimo 24h, então é aplicada uma força trativa no pino através do pistão, até o pino romper do revestimento, provocando o descolamento do pistão, que automaticamente revela o valor da tensão por tração obtido no medidor de aderência em Psig, que depois será convertido em MPa com o auxílio da tabela fornecida pela empresa do equipamento. O ensaio foi aplicado em um pino de cada vez, devido ao tamanho da placa e do pistão F-8, sendo neste caso uma desvantagem, pois só foi possível realizar um pino de cada vez.

A avaliação dos resultados fica por conta da quantificação da força e da inspeção visual do descolamento do pino, onde se caracteriza o tipo de aderência e falha do revestimento, analisando o pino e o revestimento pós-ensaio. Por isso, quanto maior for a amostragem de medidas, menor vai ser o grau de incerteza nos resultados [24,60].

Este ensaio demanda amostragem estatística de medidas, pois existe um nível intrínseco de falta de reprodutibilidade nos resultados. E se tratando de um método destrutivo é desejável observar alguns procedimentos que possam reduzir o grau de incerteza dos resultados [60]. Alguns fatores que não estão contemplados em norma e que podem ser mais bem observados são: preparação da superfície e limpeza dos pinos, força adesiva da cola utilizada e preparação da superfície do revestimento na região onde será colado o pino [24].

3.5 Processamento Digital de Imagem (PDI)

O processamento digital de imagem foi realizado através do software Fiji – ImageJ, cuja interface está mostrada na Figura 10. O ImageJ é um programa de processamento e análise de imagens de domínio público desenvolvido pela NIH Image para Macintosh [61].

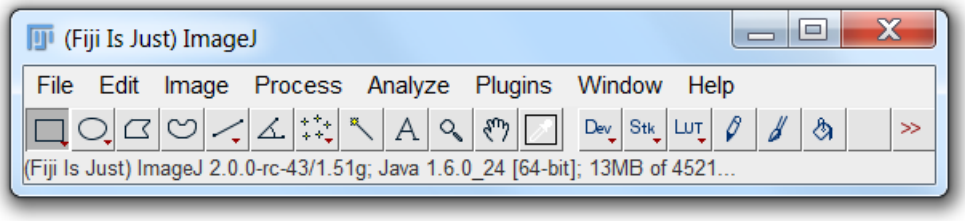


Figura 10 – Interface do software Fiji Image.

O programa pode exibir, editar, analisar, processar, salvar e imprimir imagens de 8 bits, 16 bits e 32 bits. Pode ler muitos formatos de imagem, incluindo TIFF, GIF, JPEG, BMP, DICOM, FITS e '*raw*'. Ele suporta *'stacks'* (e *hyperstacks*), uma série de imagens que compartilham uma única janela e é ‘*multithreaded’* então as operações são demoradas, como a leitura do arquivo de imagem pode ser executada em paralelo com outras operações.

Pode calcular a área e as estatísticas de valor do pixel definidas pelas seleções do usuário. Pode medir distâncias e ângulos. Pode criar histogramas de densidade e gráficos de perfil de linha. Suporta funções de processamento de imagem padrão, como manipulação de contraste, nitidez, suavização, detecção de borda e filtragem mediana [61].

O objetivo de usar o programa FIJI – ImageJ foi para saturar a imagem obtidas da microscopia ótica das amostras, usando um módulo de extensão de multiplicação, que multiplica os tons de cinza, que vão de zero até 255, por um valor qualquer escolhido. Como os tons de cinza não podem ultrapassar o tom 255, a tendência é que os pixels com valores altos de tons de cinza (tons mais claros) se aproximem do branco e fiquem brancos e aqueles pixels com valores baixos de tons de cinza (tons mais escuros) estes permanecem praticamente inalterados e tendem a ficarem pretos [62].

Foram obtidas 10 micrografias sem sobreposição de regiões, para cada uma das 3 amostras (A1.E – NiCr.Dic , A1.P – NiCr.Dic e A4.E – NiCr.Cre) utilizadas que foram distribuídas ao longo de cada região da amostra, totalizando 30 imagens.

O Processamento Digital de Imagem foi dividido em quatro etapas, cujo objetivo é quantificar a porcentagem de defeitos (óxidos, poros e inclusões) presentes nas amostras[49]:

1- Pré-Processamento
2- Segmentação
3- Pós-Processamento
4- Análise das partículas

Em todas as etapas, toma-se como exemplo uma micrografia de uma das amostras indicadas na Tabela 11, para mostrar o desenvolvimento de cada etapa e comandos utilizados.

3.5.1 Pré-Processamento

A etapa de pré-processamento consiste em adequar melhor os aspectos adquiridos e as características de interesse da imagem original digitalizada, tornando o resultado mais satisfatório para a próxima etapa de segmentação. A dificuldade desta etapa está em quantificar adequadamente um critério para o melhoramento da imagem, visto que a quantidade de técnicas de aprimoramento é empírica e variável [63].

Existem diversas ferramentas relacionadas a esta etapa de pré-processamento, as mais usadas podem-se citar [63]:

- Manipulação de brilho;
- Expansão do contraste;
- Correção da iluminação irregular;
- Redução do ruído;
- Realce de bordas;

Primeiramente, selecionamos a imagem em *File>Open*, depois *Image>Crop* com o objetivo de cortar a indicação de escala da imagem para que esta não venha a ser reconhecida como um defeito/porosidade erroneamente na etapa da Análise das partículas e *Image>Type>8-bit* colocando a

micrografia na escala de cinza adequada.

Em seguida, a imagem foi duplicada através do comando *Image>Duplicate* a fim de poder comparar a imagem original com a imagem editada, este comando pode vir a ser utilizado mais de uma vez durante o processo, caso necessário, apresentado seguidamente nas Figuras 11 a 14 [49].

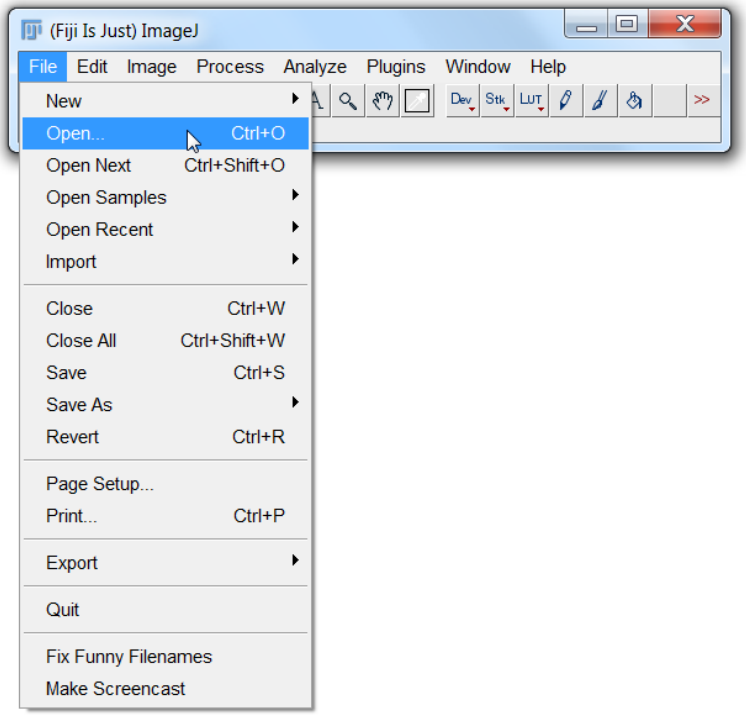


Figura 11 – Seleção da imagem em File>Open.

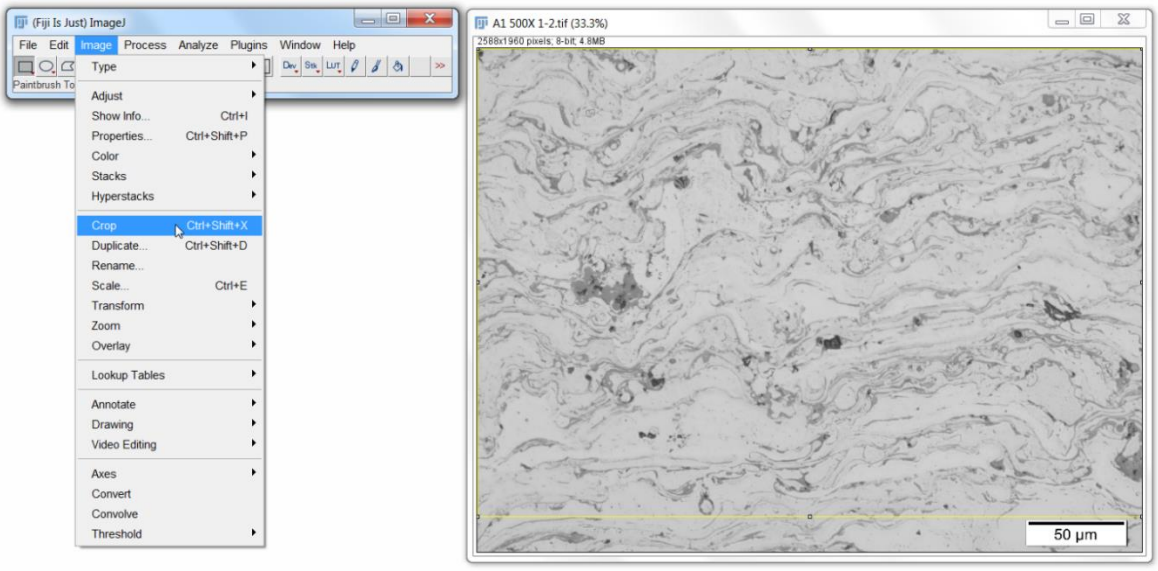


Figura 12 – Seleção da região da amostra a ser analisada, através do comando Image>Crop.

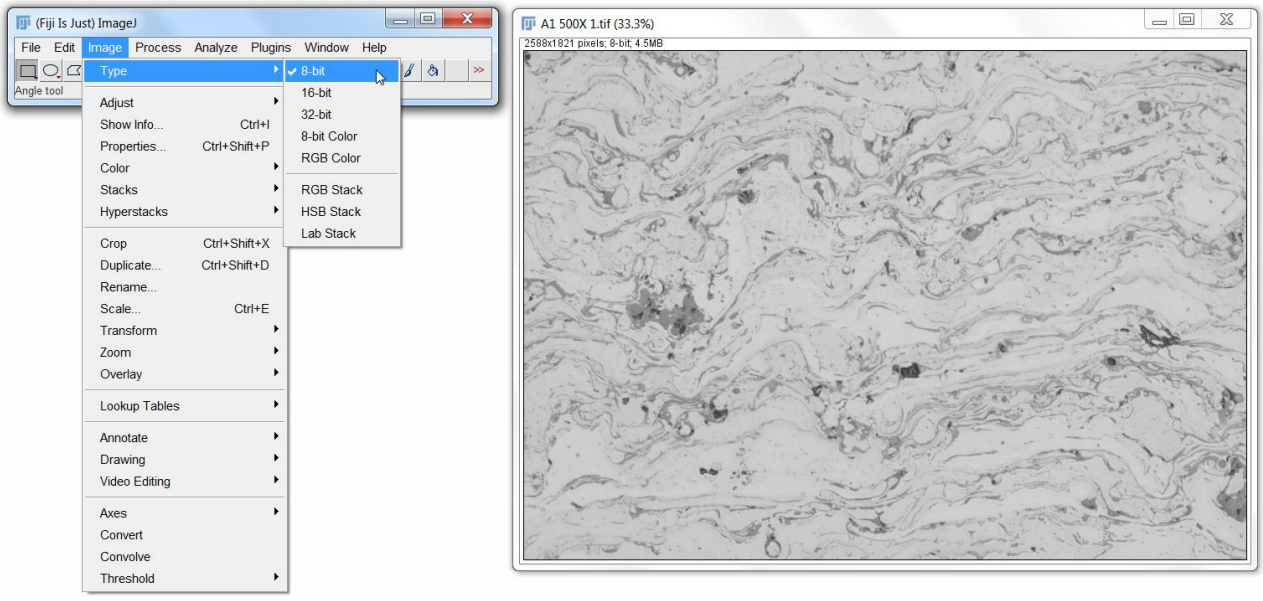


Figura 13 – Adequando a micrografia aos tons de cinza específicos para a análise, através do comando Image>Type>8-bit.

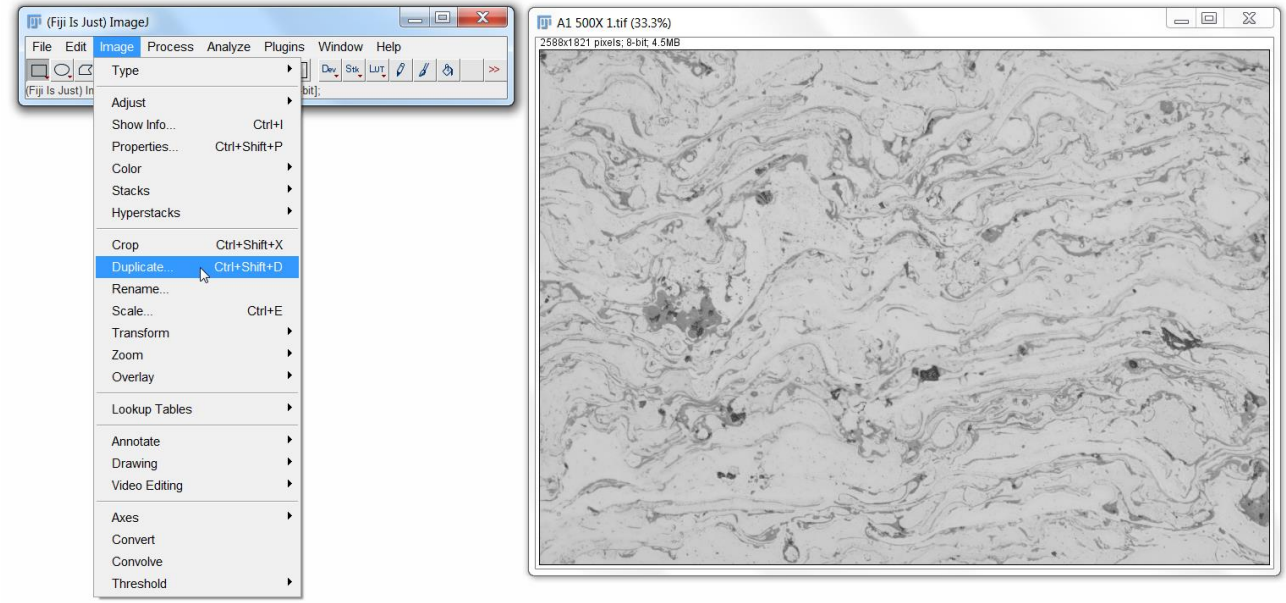


Figura 14 – Imagem duplicada a fim de poder comparar a imagem original com a imagem editada, através do comando Image>Duplicate.

Depois disso, foi realizado um contraste entre os tons mais claros e os tons mais escuros de uma das imagens somente, com o intuito de melhorar as características de interesse da micrografia tornando-as

mais nítidas para a próxima etapa de Segmentação apresentada na Figura 15, usando o comand *Image>Adjust>Brightness/Contrast* [49].

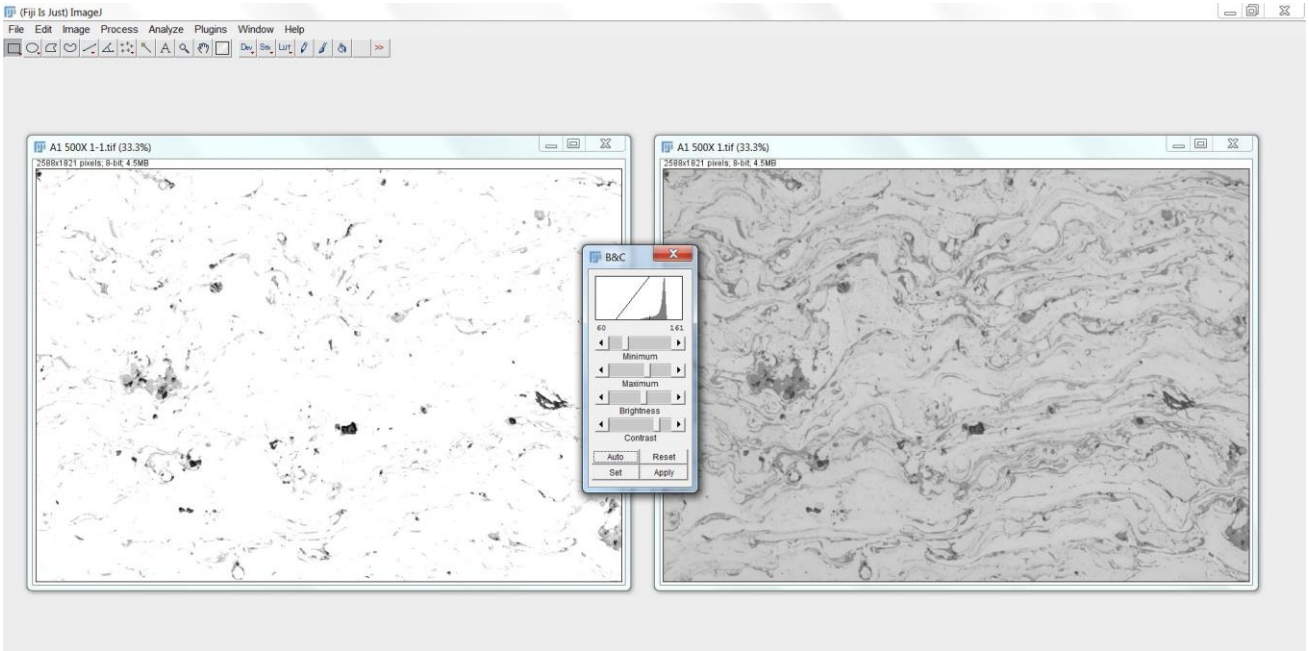


Figura 15 – Ajuste de brilho e contraste, através do comando Image>Adjust>Brightness/Contrast.

Esta primeira etapa tende a ser utilizada para corrigir os principais defeitos de imagem que normalmente são gerados durante a obtenção da mesma [64].

3.5.2 Segmentação/Limiarização

Como se sabe, a segmentação é quase sempre a etapa mais complexa do processamento de imagens e também pode ser a etapa mais longa, pois consiste em segmentar a imagem através da diferença dos níveis de cinza identificando os defeitos (poros, fases, rede de óxidos, inclusões, trincas, grãos, etc.…) e segregando os defeitos dentro de uma região aparente pelo seu contorno [65].

Algumas características de similaridade e descontinuidade desses objetos são exploradas, com relação aos níveis de cinza dos pixels através de [63]:

- Brilho;
- Texturas;
- Bordas;
- Contornos;

- Formas;

Depois de ajustar o brilho e o contraste da imagem, nesta etapa utiliza-se o comando *Image>Adjust>Threshold* que é responsável por realizar a segmentação das imagens, ressaltando os defeitos de interesse existente [49]. Após o "thresholding", uma imagem binária é formada e todos os pixels que possuíam tons cinza, se transformaram em tons brancos 1 e pretos 0, onde os tons mais claros de cinza se transformaram em brancos, e os tons de cinza mais escuros em preto[65], apresentadas na Figura 16.

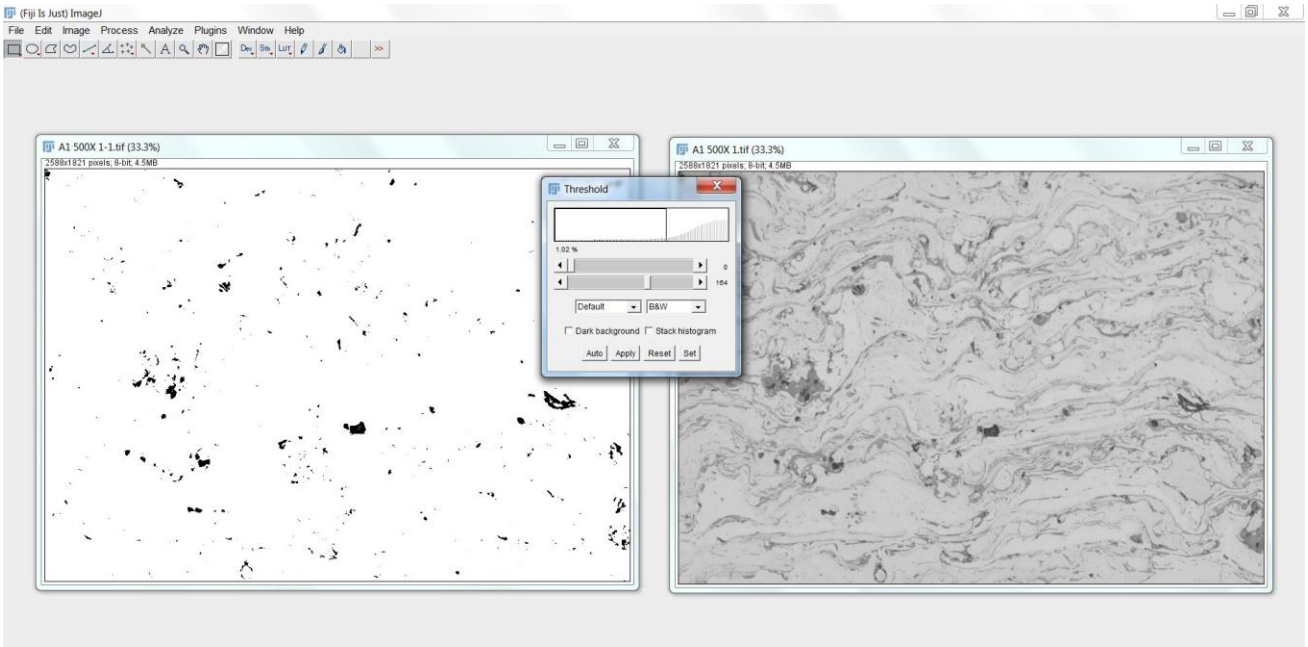


Figura 16 – Segmentação da imagem identificando os defeitos pelo seu contorno, através do comando Image>Adjust>Threshold.

A etapa de maior complexidade é representar computacionalmente um processo cognitivo que é inerente do sistema olho/cérebro humano, portanto a necessidade das variadas etapas do PDI [66].

3.5.3 Pós- Processamento

Após a segmentação, a imagem binária gerada contém ruídos que precisam ser eliminados [65]. Esta etapa de pós-processamento consiste em corrigir os possíveis defeitos gerados na etapa anterior. Com o intuito de refinar e tratar os defeitos foram utilizados diferentes comandos com a finalidade de separar objetos que se tocam e/ou estão agrupados, formando outros mais complexos [49].

Quanto a esta etapa de pós-processamento as operações morfológicas implementadas, podemos destacar algumas [63]:

- Remoção de ruídos (Remove Outliers);
- Dilatação (Dilate);
- Erosão (Erode);
- Abertura (Open);
- Fechamento (Close);

Após o "thresholding", foi utilizado o comando *Process>Binary>Open* cuja função é realizar uma operação de erosão, seguida de dilatação, suavizando os objetos e removendo os pixels isolados, apresentado na Figura 17 [61].

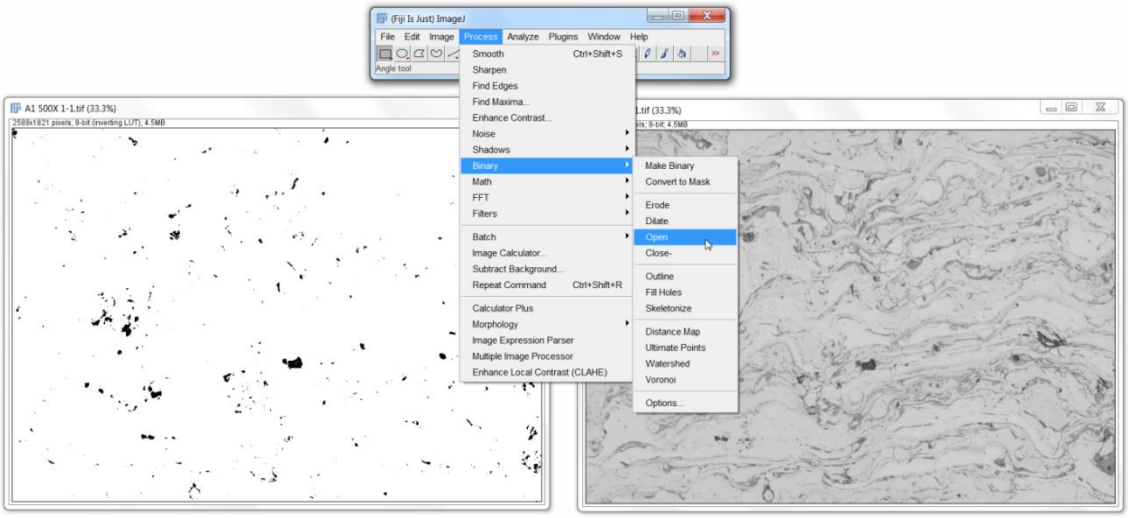


Figura 17 – Suavização dos objetos e parte dos ruídos na imagem, através do comando Process>Binary>Open.

Após o comando de Dilatação (Dilate) ter sido utilizado, em seguida utiliza-se o comando *Process>Noise>Remove Outliers*, que remove as partículas muito pequenas, consideradas ruídos, na Figura 18 [49]. O comando Remove Outliers substiui um pixel pela mediana dos pixels no ambiente e se desvia da mediana por mais de um certo valor de *Threshold*, e esse pixel é removido, preservando razoavelmente, a forma dos objetos de interesse [61].

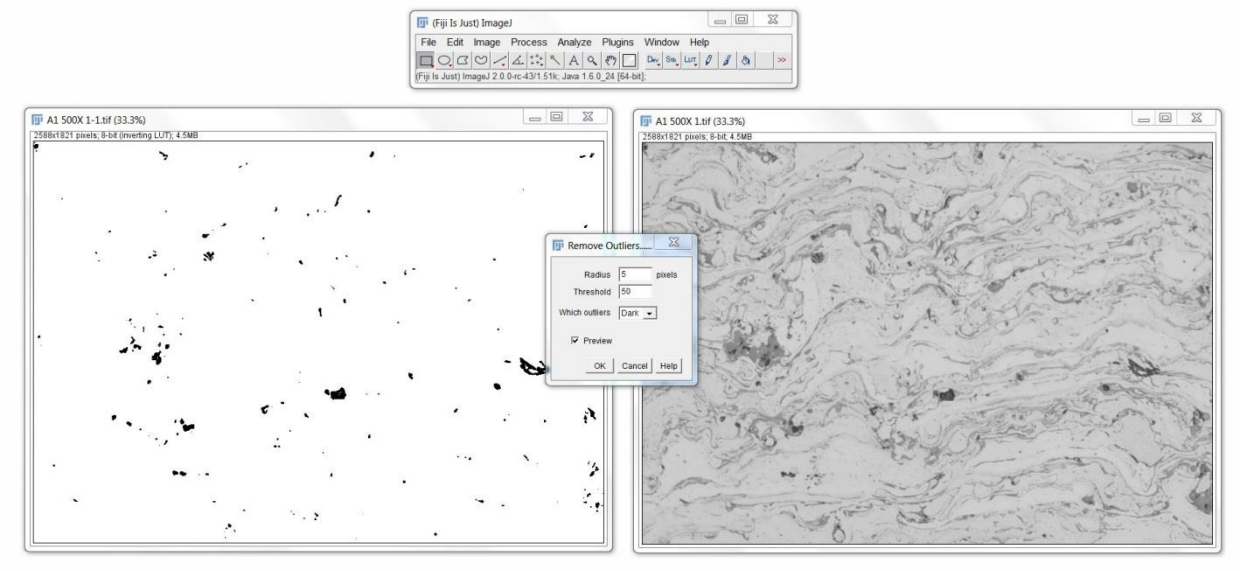


Figura 18 – Remoção de partículas bem pequenas dos ruídos, através do comando Process>Noise>Remove Outliers.

3.5.4 Análise das partículas

É a etapa final resultante e dependente das etapas anteriores, nesta parte o software calcula a quantidade de elementos segmentados (ou seja, poros ou óxidos, de acordo com o tratamento desejado). Utilizando o comando *Analyze>Analyze Particles*, o objetivo dele é contar e medir os objetos escaneando a imagem até encontrar a borda de um elemento. Em seguida, descreve-se a forma e mede o tamanho do elemento, depois o preenche para torná-lo invisível e, em seguida retoma a digitalização até chegar ao final da imagem selecionada e obter o resultado da análise [61].

A Figura 19 apresenta um exemplo da configuração deste comando *Analyze Particles*.

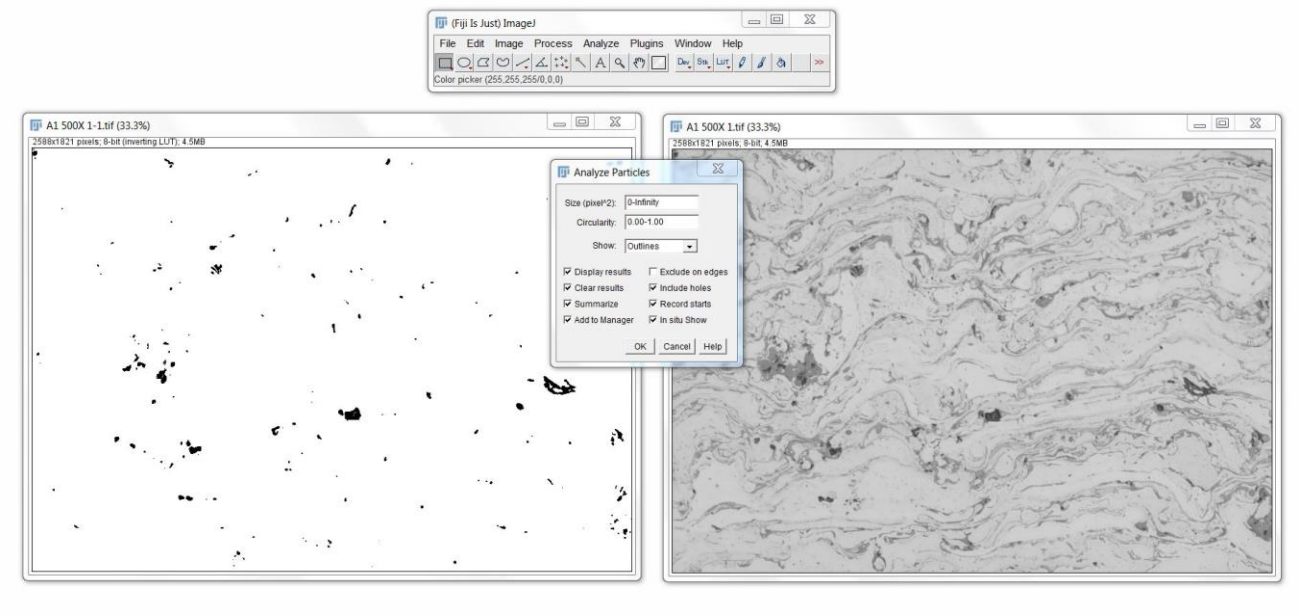


Figura 19 – Configuração da quantificação dos defeitos, através do comando Analyze>Analyze Particles.

Após a análise das partículas é gerado o resultado do processamento da imagem, que leva em consideração a quantificação e qualificação dos itens, destacados abaixo e na Figura 20 e 21 com um resultado de exemplo gerado da amostra A1 500x -1(A1. E – NiCr.Dic) [61,49]:

- Quantidade total dos elementos segmentados;
- Área total da imagem selecionada;
- Tamanho médio entre os elementos segmentados;
- Porcentagem da área dos elementos segmentados;

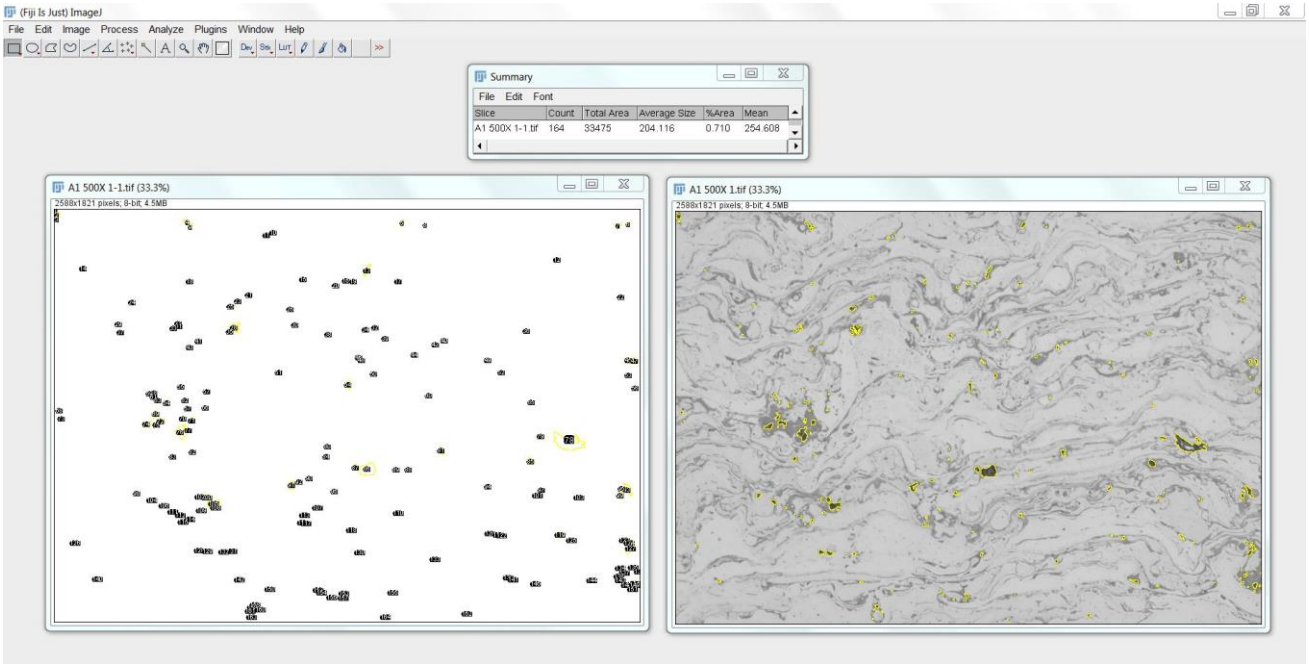


Figura 20 – Resultado da quantificação dos defeitos, através do comando Analyze>Analyze Particles

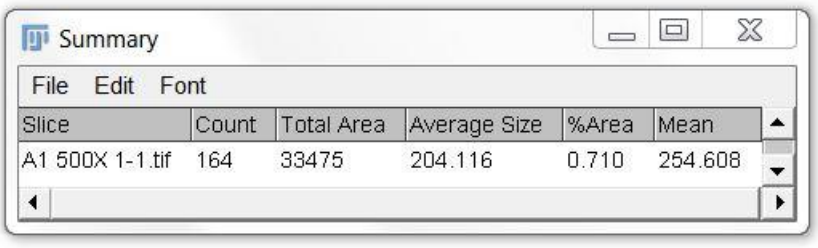


Figura 21 – A porcentagem de área correspondente aos elementos segmentados (Summary)

3.6 Ensaio de Microdureza Vickers

O Ensaio de Microdureza Vickers foi obtido experimentalmente utilizando o Equipamento Durômetro de Modelo 422 MVD, localizado no Laboratório de Materiais (LAMAT) do CEFET/RJ.
O princípio deste ensaio é realizar uma série de indentações numa região da amostra, que contemple em sua análise o substrato, a interface e o revestimento. Dependendo do objetivo a ideia é criar e propagar uma fissura ao longo da interface entre o revestimento e o substrato, e também para determinar a tensão residual no revestimento [67]. A Figura 22 mostra a representação esquemática do ensaio de microdureza.

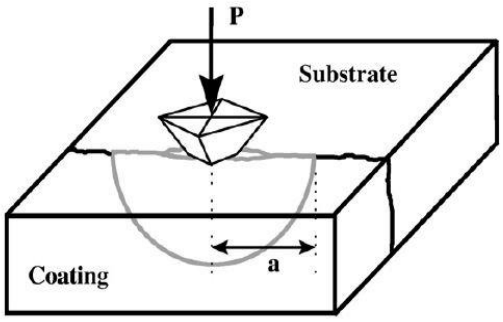


Figura 22 – Representação esquemática do Ensaio de Dureza [67].

De acordo, com a ISO 6507 [68] o método do Ensaio de Microdureza Vickers especifica três diferentes faixas de força para serem escolhida dentre uma delas para realizar o ensaio de microdureza para materiais metálicos [68], indicados na Tabela 13.

Tabela 13 – Intervalos de Força de Ensaio de Dureza [77]

Intervalos de Força de Ensaio, F(N)	**Símbolo de Dureza**	**Designação**
$F \geq 49{,}03$	≥ HV 5	Ensaio de Dureza Vickers
$1{,}961 \leq F < 49{,}03$	HV 0,2 até < HV 5	Ensaio de Dureza Vickers de baixa força
$0{,}098\ 07 \leq F < 1{,}961$	HV 0,01 até < HV 0,2	Ensaio de Microdureza Vickers

Portanto, as medições utilizaram um indentador Vickers com força de 0,30kgf por 10 segundos com espaçamentos em média de 0,2 mm na vertical e aproximadamente 70um. Foram efetuadas 18 indentações, somente na amostra A1.P – NiCr.Dic, pois as amostras A1.E – NiCr.Dic , A1.P – NiCr.Dic e A4.E – NiCr.Cre possuem a mesma composição química.

As indentações foram divididas da seguinte forma, primeiro, uma medição na interface, depois uma medição no substrato, e as outras quatro medições foram realizadas no revestimento, verticalmente.

Esse processo foi repetido três vezes, pelo mesmo operador. Logo, foram efetuadas 18 indentações, que consistiram em três colunas de medições com 6 indentações cada.

A disposição das indentações na amostra será exemplificada na Figura 23.

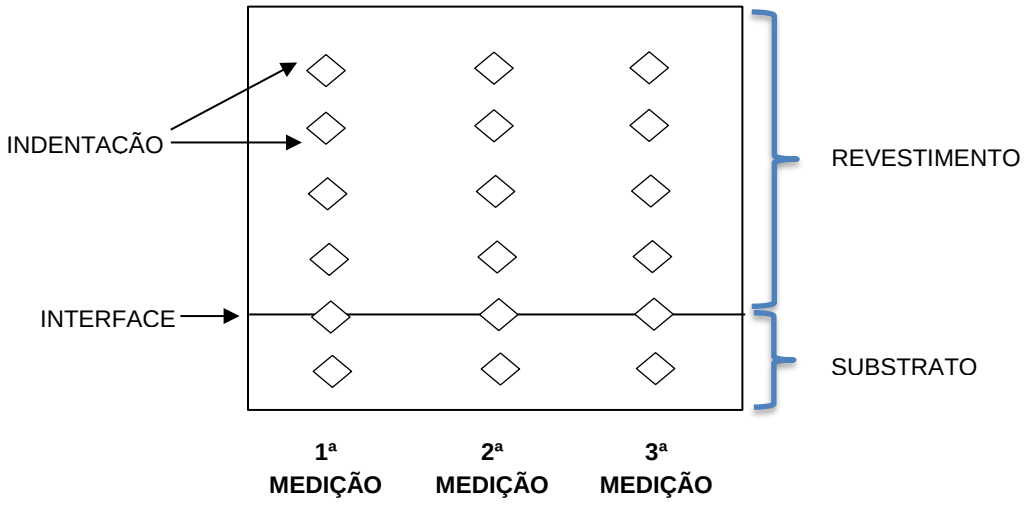


Figura 23 - Desenho com o posicionamento das indentações.

4 Resultados e Discussão

4.1 Microscopia Óptica

A técnica de microscopia óptica permitiu identificar os tipos de defeitos como poros, inclusões, trincas, rede de óxidos e o aspecto e a forma da microestrutura das três condições de revestimento estudadas nas amostras A1.E – NiCr.Dic , A1.P – NiCr.Dic e A4.E – NiCr.Cre, como mostrado na Tabela 11.

Para gerar as micrografias foram utilizadas lentes de aumento de 200x e 500x. Com a lente de 200x foi gerada uma micrografia para cada amostra com o intuito de identificar as regiões do substrato (parte mais clara), da interface (liga intermediária de aderência), do revestimento e do baquelite (parte mais escura). Já com a lente de 500x, o objetivo foi de identificar os vazios, óxidos e porosidades presentes na região do revestimento, como mostrado na Figura 24 para a amostra A1.E – NiCr.Dic, na Figura 25 para a amostra A1.P – NiCr.Dic e na Figura 26 para a amostra A4.E – NiCr.Cre.

A identificação dos tipos de porosidades foi realizada com base nas regiões das micrografias obtidas e com o auxílio da metodologia proposta por Vreijiling [44], que apresenta e descreve cada tipo de porosidade. O processo é cognitivo e inerente do sistema olho/cérebro humano, portanto apresenta um grau de complexidade na identificação dos tipos de defeitos.

- Amostra A1.E – NiCr.Dic - Eixo com Selante S2

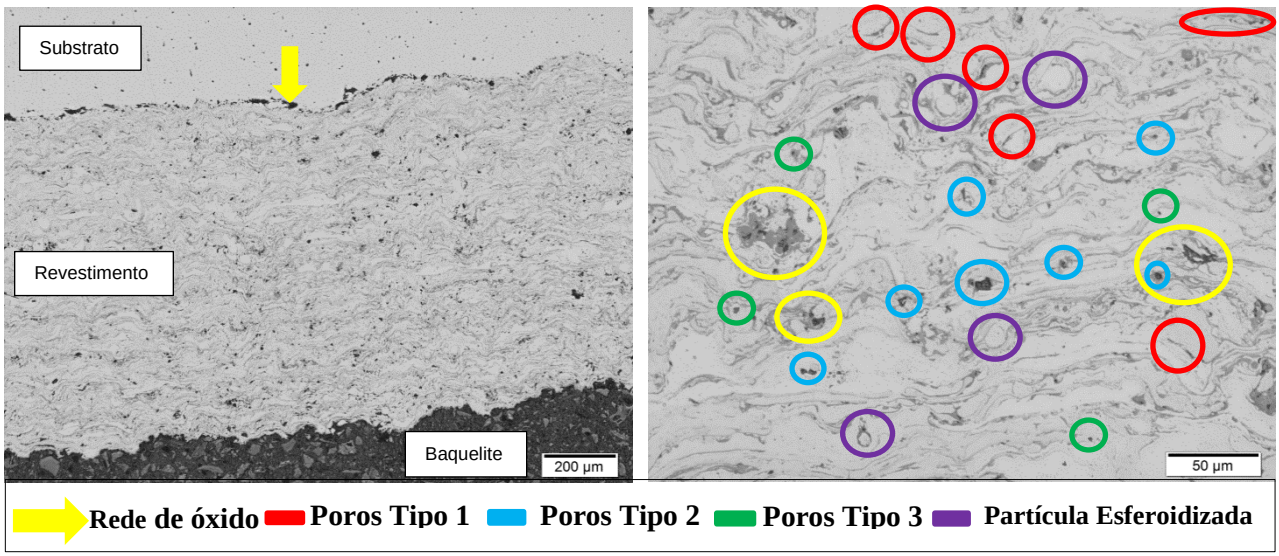


Figura 24 - Aumento de 200x e Aumento de 500x (A1 - 500X - 1), respectivamente.

- Amostra A1.P – NiCr.Dic - Placa com Selante S2

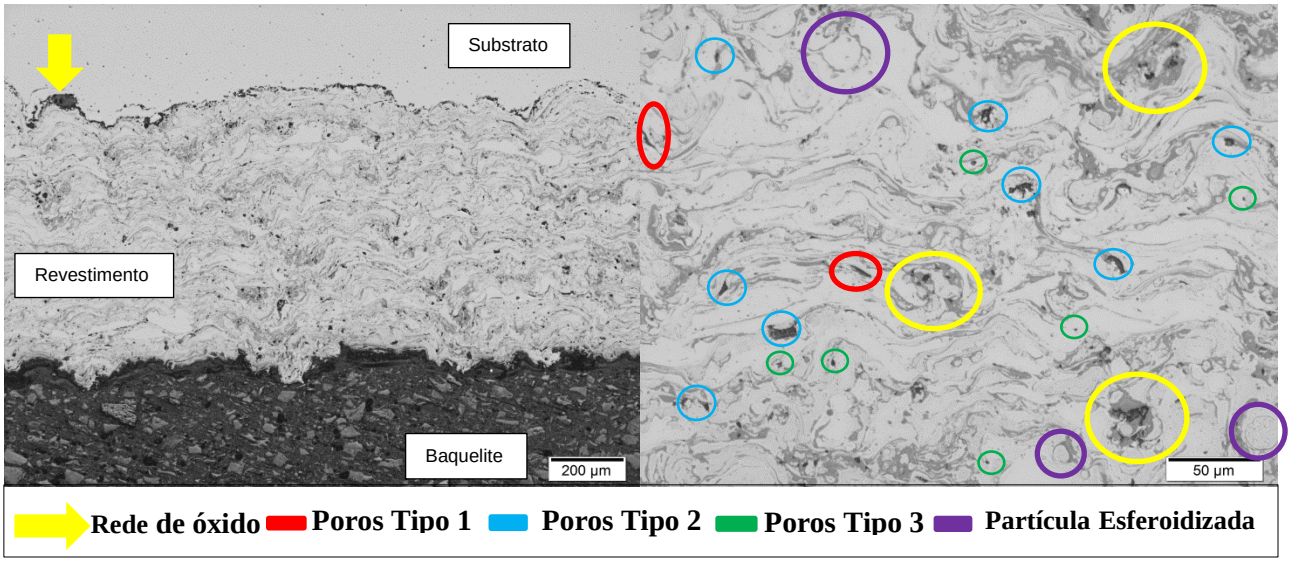


Figura 25 - Aumento de 200x e Aumento de 500x (A1P - 500X - 1), respectivamente.

- Amostra A4.E – NiCr.Cre - Eixo com Selante S1

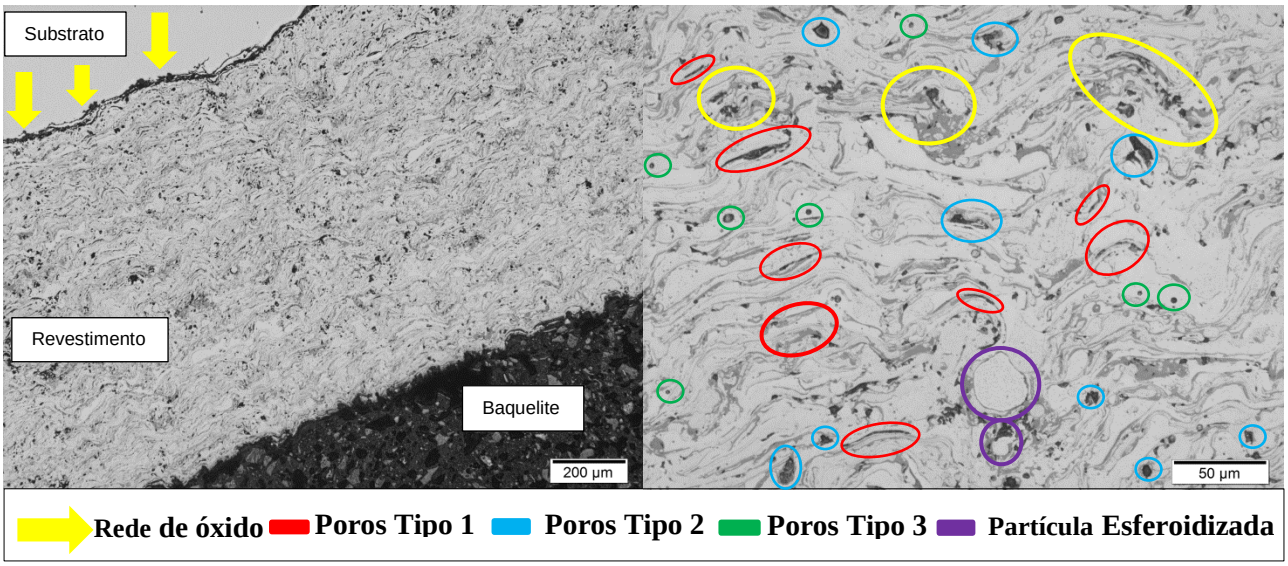


Figura 26 - Aumento de 200x e Aumento de 500x (A4 - 500X - 1), respectivamente.

Observando o resultado da microscopia óptica foi possível identificar lamelas espessas empilhadas em camadas do tipo panqueca (splats), de vários tamanhos e homogêneas, que são resultantes das partículas aspergidas na superfície das placas e dos cilindros apresentando um comportamento característico de revestimentos aspergidos pela aspersão térmica à arco elétrico [26].

As superfícies com contornos acinzentados normalmente estão relacionadas a presença de rede de óxidos e inclusões, enquanto que as superfícies que apresentam regiões mais escuras nas micrografias estão relacionadas a presença de vazios [24,69].

Em qualquer amostra é possível observar a presença de porosidades de alguns dos sete tipos, que foram classificados, segundo a metodologia de *Vreijling* [44]. A análise da porosidade não está relacionada às condições de acabamento superficial e a presença de selante, pois o que influencia na presença da porosidade é a geometria do substrato.

Comparando os substratos em forma de placa e cilíndrico, os substratos cilíndricos apresentaram uma maior concentração de porosidade do que nos substratos em forma de placa. Isso ocorre devido a velocidade tangencial das partículas nessa condição, o empilhamento das lamelas formando um revestimento irregular, o que não ocorre nos substratos em forma de placa que apresentaram revestimentos mais uniformes [50].

Em todas as amostras, identificou-se através da análise das micrografias com auxílio da literatura que o revestimento apresenta predominantemente porosidades do tipo 1, 2 e 3, conforme apresentadas na figura 8, onde o tipo 1 (são provenientes do empilhamento desordenado das lamelas, que podem estar relacionados ao tamanho da partícula aspergida e à distribuição do material de alimentação), o tipo 2 (ocorre de bolsas de gás que ficaram presas durante o processo de aspersão, devido a turbulência do fluxo de gás) e o tipo 3 (que gera bolhas de gás causada pela dissolução do gás no metal fundido, que evaporam com a solidificação do metal depositado) [44,46]. Também houve a presença de partículas não fundidas e rede de óxidos e vazios e outros tipos de porosidade em pequena quantidade como, por exemplo, o tipo 4.

Porém, observa-se que no caso da amostra A1.E – NiCr.Dic a quantidade de porosidade predominante é a porosidade do tipo 2, pois estão distribuídas ao longo da amostra em maior quantidade. Já na amostra A1.P – NiCr.Dic a quantidade de porosidade que predomina é a do tipo 3 e a amostra A4.E – NiCr.Cre apresentou uma quantidade elevada de porosidades do tipo 1.

Todas as amostras apresentarem partículas esferoidizadas. Isto se deve a vários fatores que vão desde a forma geométrica da amostra, o controle da temperatura, velocidade das partículas durante o processo de aspersão térmica, distância entre a pistola e o substrato, ângulo de aspersão, taxas de alimentação, arames de menores diâmetros, gases inertes, redução da voltagem do arco, material da amostra e composição do revestimento [26,45].

Comparando com os resultados de outros trabalhos a microestrutura do revestimento obtido apresentou aspecto lamelar e tipos de porosidade, rede de óxidos, partículas não solidificadas e vazios similares aos trabalhos de Freitas [24], Trojan et. al. [49], Brito [50] e Pinheiro [46]. O processo de aspersão térmica realizado em ambos foi ao arco elétrico, que apresenta uma maior quantidade de óxidos e partículas não solidificadas se comparados com os revestimentos aspergidos por outros processos de aspersão térmica [26].

4.2 Ensaio de Aderência

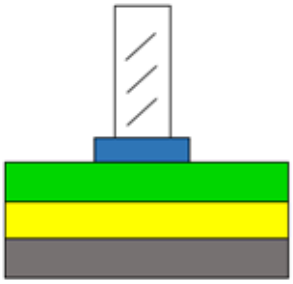
O ensaio de aderência por tração, também conhecido como *Pull-Off* foi utilizado para medir a aderência de duas placas cada uma com um revestimento de níquel-cromo e cobalto-cromo, respectivamente, com as condições dadas na Tabela 6.

Para analisar os resultados, foi utilizada como base uma descrição dos tipos de falha, de acordo com a NBR 15877[71], apresentadas na Tabela 14:

Tabela 14 – Descrição dos Tipos de Falha [71]

Tipo de Falhas	Descrição
A	Falha de aderência entre o revestimento e o substrato, expondo o substrato.
B	Falhas de coesão no interior da camada de revestimento.
C	Falhas de aderência entre demão.
Z	Falha de aderência entre o adesivo e o revestimento.
Y	Falha de aderência entre o carretel e o adesivo.

Em todos os ensaios realizados até o arrancamento, foi calculado o percentual de falhas adesivas e coesivas de acordo com suas respectivas áreas e localizações na superfície da placa, constituído das camadas de revestimento e o adesivo [66]. Os pontinhos "brancos" presente em algumas imagens a seguir, aparecem por conta do polimento. O esquema abaixo descreve o sistema de ensaio e a ocorrência de falhas possíveis, conforme Figura 27.



Carretel (Y) - Falha de aderência entre o carretel e o adesivo.

Adesivo (Z) - Falha de Aderência entre o adesivo e o revestimento.

2ª demão (C) - B/C, C/D etc... Falha de aderência entre demão.

1ª demão (D) - B, C, D etc... Falha de Coesão no interior da camada de tinta/adesivo.

Substrato (A) - A/B Falha de aderência entre o revestimento e o substrato, expondo substrato.

Figura 27 - Desenho esquemático para interpretação de resultados [71].

Dos resultados obtidos do ensaio de aderência, a interação no geral foi satisfatória, a resistência a tração variou de 5,3MPa a 25MPa para as 2 placas nas condições estudadas, descritas na Tabela 12 que geraram 6 resultados. Levando em consideração somente os resultados nas regiões das placas com polimento, estas apresentam uma resistência a tração de adesão média global de 17,95MPa.

A placa A1.P – CoCr.Epo, com revestimento de liga CoCr, conforme mostrado na Figura 28, apresentou no Pino A, uma falha de aderência entre o carretel e o adesivo de 70%Y e falha de aderência entre o adesivo e o revestimento de 30%Z, pois parte do adesivo saiu e o selante assim como a superfície do revestimento, permaneceram intactas e uma parte maior do adesivo ficou sobre a superfície. No caso do Pino B houve uma pequena falha de coesão no interior da camada de revestimento, retirando uma pouco do adesivo e do revestimento de 10%B e uma falha de aderência entre o carretel e o adesivo de 90%Y.

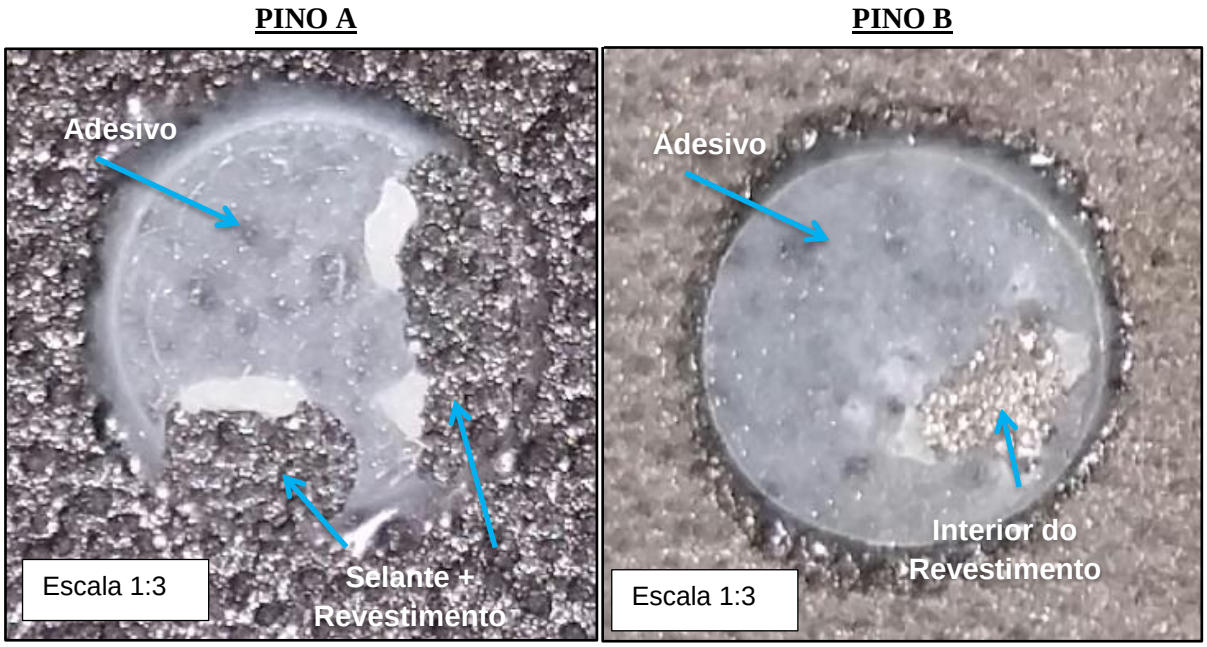


Figura 28 – Aspecto da placa 1 com e sem selante – Pino A e Pino B (Ambos centralizados e sem polimento)

A placa A1.P – CoCr.Epo estava sem polimento, foi necessário aplicar uma quantidade maior de adesivo para nivelar a superfície, o que no ensaio resultou no arrancamento somente do adesivo e também na falta de aderência entre o pino e o adesivo e consequentemente gerando valores menores de resistência a tração de 10,1MPa e 9,6MPa, respectivamente.

Como o resultado acima não foi satisfatório, foi realizado na placa A1.P – CoCr.Epo na região com polimento, Figura 29, também outro ensaio de aderência, somente na parte sem selante e foi feito um polimento com o intuito de reduzir a quantidade de adesivo aplicada e assim analisar o comportamento do adesivo e do revestimento e se haveria alguma mudança no resultado da resistência a tração.

Assim, foi obtido o resultado no Pino B_1, localizado próximo ao selante. O Pino B_1 apresentou uma falha de coesão no interior da camada de revestimento de 60%B, havendo arrancamento de um pouco do revestimento, uma falha de aderência entre o carretel/pino e o adesivo de 10%Y, e uma falha de aderência entre o adesivo e o revestimento de 30%Z, onde ficou presente somente nas bordas o resíduo do adesivo.

PINO B_1

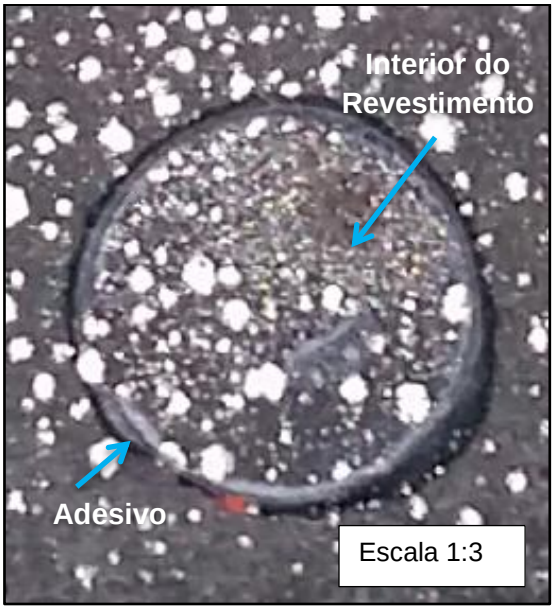


Figura 29 – Aspecto da placa A1.P – CoCr.Epo sem selante – Pino B1 (Próximo do selante e com polimento)

A placa A1.P – CoCr.Epo estava com polimento, e foi aplicada uma fina camada de adesivo [45], o que no ensaio resultou no arrancamento de grande parte do adesivo e um pouco do interior do revestimento e também melhorou a aderência entre o pino e o adesivo, apresentando valores superiores de resistência a tração de 24,7MPa, se comparados com os resultados dos Pinos A (10,1MPa)e B (9 MPa), onde a placa estava sem polimento e a quantidade de adesivo era maior.

A placa A2.P – NiCr.Epo, com revestimento de liga NiCr, demonstrado na Figura 30 , apresentou no Pino C, uma falha de coesão no interior da camada de revestimento de 30%B e uma falha de aderência entre o carretel/pino e o adesivo de 70%Y, enquanto que o Pino D apresentou uma falha de aderência entre o adesivo e o revestimento de 100%Z, onde todo o adesivo foi retirado e ficou fixado no pino. Na placa A1.P – CoCr.Epo sem polimento foi aplicada uma quantidade superior de adesivo com o intuito de nivelar a superfície e não colocar apenas uma fina camada como é o recomendado [58].

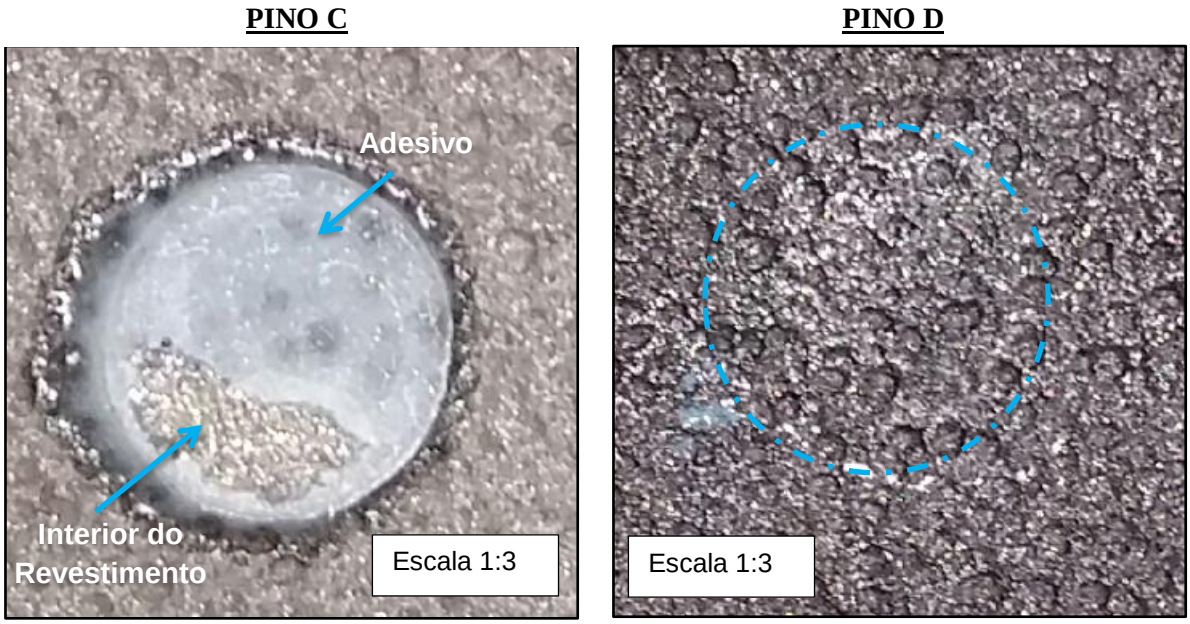


Figura 30 – Aspecto da placa 2 sem selante e com selante – Pino C e Pino D (ambos centralizados e sem polimento)

A placa A2.P – NiCr.Epo estava sem polimento como na placa A1.P – CoCr.Epo e como foi aplicado uma camada mais grossa de adesivo para nivelar, resultou numa falha de aderência entre o pino e o adesivo e os valores de resistência a tração foram de 5,3MPa e 12,4MPa e, respectivamente. Ou seja, os resultados não foram satisfatórios, pois não foi possível analisar totalmente a interação entre o pino, o adesivo e o revestimento, principalmente no Pino D, onde houve falha de aderência de 100% entre o adesivo e o revestimento.

O ensaio foi realizado também na placa A2.P – NiCr.Epo na região com polimento, para analisar e comparar com o resultado dos Pinos C e D. A Figura 31 apresenta o Pino C_1 que apresentou falha de aderência entre o pino e o adesivo de 10%Y e uma falha de aderência entre o adesivo e o revestimento de 90%Z, onde ficou presente somente os resíduos do adesivo.

PINO C_1

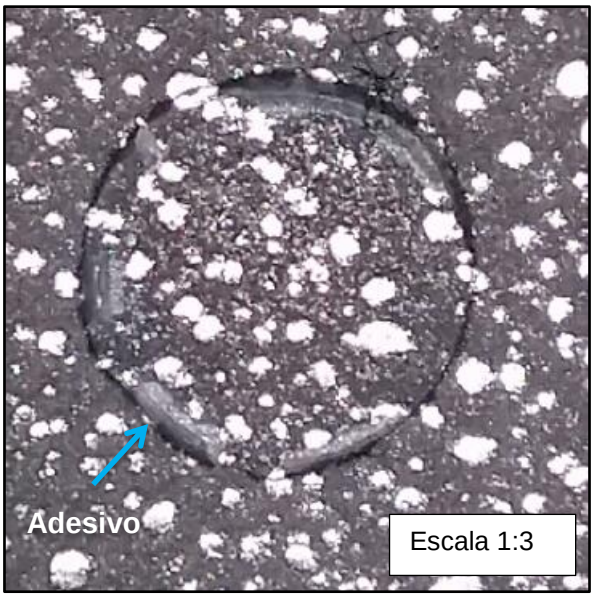


Figura 31 – Aspecto da condição 2 com e sem selante – Pino C1 (Próximo do selante e com polimento).

Os resultados foram bem satisfatórios na placa A2.P – NiCr.Epo com polimento se comparados com outros trabalhos, percebe-se que a interação entre o pino e o adesivo melhorou, gerando resultados superiores de resistência a tração de 25MPa, se comparados também com os resultados dos Pinos C (12,4MPa) e D (5,3MPa), que estavam sem polimento e a quantidade de adesivo era maior.

Segundo a norma da PETROBRAS N-2568 [58], os valores mínimos individuais recomendados para o ensaio de aderência do alumínio e aços inoxidáveis são 7 MPa e 10 MPa, respectivamente. As médias de resistência a tração de cada placa A1.P – CoCr.Epo e A2.P – NiCr.Epo foram de 14,8 MPa e 13,3 MPa, respectivamente, levando em consideração até os casos em que a superfície não estava polida, que foram os que apresentaram os menores valores de resistência a tração.

Serão levados em consideração somente os casos na região sem selante, onde a superfície foi polida e estava com uma camada fina de adesivo. Visto que, a região sem polimento com selante estava desnivelada por conta da superfície rugosa, se fosse polida no lado com o selante a superfície reduziria a sua rugosidade, mas em compensação o selante seria perdido. Então, essas regiões foram descartadas, por

apresentarem resultados indiferentes para discursão dos resultados. Nas regiões polidas as médias de resistência a tração em cada uma das placas A1.P – CoCr.Epo e A2.P – NiCr.Epo foram bem superiores, em torno de 24,7 MPa e 25MPa, respectivamente.

Os resultados do ensaio de aderência das placas A1.P – CoCr.Epo e A2.P – NiCr.Epo, utilizando o pino de 15mm de diâmetro e o pistão F8 (Resistência a tração de até 28MPa), estão representados na Tabela 15:

Tabela 15 – Resultados do Ensaio de Aderência por Tração.

Placa	Pino	Psig	MPa	Tipos de falha	% Percentual
A1.P – CoCr.Epo	A	35.8	10.1	Y e Z	30%Z e 70%Y
	B	34.2	9.6	B e Z	10%B e 90%Y
	B_1	87.8	24.7	Z, B e Y	10%Y e 60%B e 30%Z
A2.P – NiCr.Epo	C	44.1	12.4	B e Z	30%B e 70%Y
	C_1	88.9	25	B e Y	10%Y e 90%Z
	D	19	5.3	Y	100%Z

A resistência à tração consideravelmente maior, se comparadas com os valores em outros processos [72], se deve a composição química das amostras com a presença das ligas cobalto-cromo e níquel-cromo, gerando uma força adesiva superior, além do polimento do revestimento antes de colar os pinos. A diminuição na camada de adesivo aplicada se mostrou eficiente na redução das falhas entre o revestimento e o adesivo, e consequentemente aumentando à resistência a tração [60].

Comparando o resultado encontrado com outros trabalhos, Antunes [28] realizou o ensaio de *Pull-Off* em amostras com revestimentos de Fe-Cr e Fe-Co, e encontrou valores mínimos e máximos de resistência a tração de 14MPa e 25,3MPa, respectivamente. Os tipos de falhas encontrados estão entre Z e mista A/B. A resistência a tração de adesão média global foi de 20,9MPa. No trabalho de Trojan *et al*. [49] as amostras foram revestidas de Fe-Cr-Ni e Fe-Co-Cr-Ni e foram encontrados valores mínimos e máximos de 24,9 MPa e 29,7 MPa, respectivamente. Os tipos de falha encontrados estão entre B e Z, além de resistência a tração de adesão média global de 26,82 MPa.

Malek *et al*. [72] realizaram ensaios em amostras com revestimentos de liga de alumínio (99.5% Al) e encontraram valores mínimos e máximos de resistência a tração de 9,38MPa e 12,38MPa, respectivamente. A resistência a tração de adesão média global ficou em torno de 10,83MPa.

Uma comparação entre os valores encontrados na literatura para os ensaios de aderência e os valores obtidos neste trabalho, apresentados abaixo na Tabela 16:

Tabela 16 – Comparativo da resistência à tração de adesão média global do trabalho atual e de outros resultados.

Autores	**Tensão (MPa)**	**Revestimento**
Antunes (2013)	20,90	Fe-Cr e Fe-Co
Malek (2013)	10,83	Liga de Alumínio (99,5% Al)
Trojan *et al.* (2015)	26,82	Fe-Cr-Ni e Fe-Co-Cr-Ni
Atual (2018)	17,93	Ni-Cr e Co-Cr

Deve-se destacar que a adesão varia bastante entre os diversos tipos de processo de aspersão térmica. Thiem *et al*. [73] avaliando a aderência em um revestimento de Fe-28AL-5Cr utilizaram os processos de aspersão térmica de plasma, chama e HVOF e obtiveram valores médios de 13,8MPa, 30,3MPa e >61,8MPa, respectivamente, observando que as diferentes fases geradas por cada processo contribuíram na interface de adesão revestimento/substrato.

Se comparadas aos outros dois processos, o HVOF apresentou o menor teor de óxido e a melhor adesão na superfície, devido a sua maior velocidade de impacto das partículas. Sendo a técnica mais promissora devido à maior dureza e força de adesão adquirida.

O processo aspersão a frio a altas temperaturas (*Cold spray high pressure*) não utiliza calor, e por essa razão tanto o revestimento quanto o substrato não são influenciados por oxidação, distorção ou tensão térmica à alta temperatura. Sendo um método promissor de reparo de substratos e/ou de superfícies sensíveis ao calor ou oxidação, Sun *et al.* [74] avaliaram este processo utilizando revestimentos de CoCrMo e Ti6A14V, pois possuem boa qualidade e baixos níveis de porosidade, além de elevada dureza. O resultado de aderência no revestimento foi de 66, 17 MPa e 50,38 MPa, respectivamente, apresentando baixos níveis de porosidade e ótima interface de adesão revestimento/substrato.

Os resultados na presente dissertação foram satisfatórios com valores mínimos de 5,3MPa e máximo de 25MPa. A resistência à tração de adesão média global foi de 14, 5 MPa. Com tipos de falha entre Y, B e Z. Os fatores que justificam as falhas adesivas e coesivas podem estar relacionados com a preparação da superfície, limpeza dos pinos, força adesiva da cola utilizada, preparação da superfície do revestimento na região onde será colado o pino [24] e a presença de defeitos no revestimento (poros, óxidos

e microtrincas) [49]. Nos revestimentos rugosos, a presença da fraca interação "*inter-splat*", ocorre devido a velocidades de partículas inferiores a velocidade do processo de aspersão térmica em questão, gerando uma baixa adesão do revestimento [43].

4.3 Processamento de Imagem (PDI)

O processamento de imagens (PDI) foi realizado utilizando o software Fiji – ImageJ [61], que é um software utilizado para análise de imagens e quantificação de defeitos em geral. Ao todo foram analisadas 30 imagens, sendo 10 imagens correspondente à 10 regiões distribuídas ao longo de cada uma das amostras com o intuito de contemplar a região da amostra por completo, sem que haja sobreposição das regiões/imagens e levando-se em consideração todos os tipos de defeitos.

Na fase Análise das partículas foram encontrados os percentuais de defeitos em cada uma das amostras , gerados a partir do processamento de imagem no software Fiji – ImageJ, que foi detalhado no item 3.5.4. Nesse processamento de imagem a média aritmética de porosidade por amostra, a variância e o desvio padrão foram calculadas.

A variância e o desvio padrão determinam a dispersão de um conjunto de valores determinados, onde a variância indica o quão distante os valores estão da média e o desvio padrão indica o "erro" em um conjunto de valores correlacionados à média [75]. Os dados obtidos estão na Tabela 17, lembrando que todas as amostras foram revestidas na condição 3 (Liga de níquel-cromo) apresentadas na Tabela 11, onde a amostra A1 é do tipo eixo (A1.E – NiCr.Dic), A1P é do tipo placa (A1.P – NiCr.Dic), ambas com selante Selante S2, e A4 é do tipo eixo (A4.E – NiCr.Cre), com selante Selante S1.

Tabela 17 – Percentual de porosidade das amostras A1.E – NiCr.Dic,A1.P – NiCr.Dic,A4.E – NiCr.Cre (Média aritméticas, Variâncias e Desvio padrões)

Eixo com Selante S2 (A1)		**Placa com Selante S2 (A1P)**		**Placa com Selante S1 (A4)**	
Slice	**% Área**	**Slice**	**% Área**	**Slice**	**% Área**
A1 500X 1	**0,64**	**A1P 500X 1**	**0,88**	**A4 500X 1**	**2,01**
A1 500X 2	**0,75**	**A1P 500X 2**	**0,72**	**A4 500X 2**	**3,21**
A1 500X 3	**0,69**	**A1P 500X 3**	**1,05**	**A4 500X 3**	**2,22**
A1 500X 4	**0,92**	**A1P 500X 4**	**1,52**	**A4 500X 4**	**1,25**
A1 500X 5	**0,26**	**A1P 500X 5**	**1,03**	**A4 500X 5**	**2,51**
A1 500X 6	**0,44**	**A1P 500X 6**	**0,73**	**A4 500X 6**	**2,35**
A1 500X 7	**0,73**	**A1P 500X 7**	**0,73**	**A4 500X 7**	**2,17**
A1 500X 8	**0,62**	**A1P 500X 8**	**0,68**	**A4 500X 8**	**2,25**
A1 500X 9	**0,54**	**A1P 500X 9**	**0,80**	**A4 500X 9**	**1,62**
A1 500X 10	**0,60**	**A1P 500X 10**	**2,15**	**A4 500X 10**	**2,72**
Mínimo	**0,256**	**Mínimo**	**0,680**	**Mínimo**	**1,248**
Média	**0,618**	**Média**	**1,028**	**Média**	**2,230**
Máximo	**0,917**	**Máximo**	**2,148**	**Máximo**	**3,209**
Desvio Padrão	**0,172**	**Desvio Padrão**	**0,443**	**Desvio Padrão**	**0,519**
Variância	**0,029**	**Variância**	**0,196**	**Variância**	**0,269**

Analisando os resultados, a amostra A1.E – NiCr.Dic foi a que apresentou valores menores de defeitos com média de aproximadamente 0,62%, com variações de máximos e mínimos de 0,92% e 0,26%, respectivamente. A amostra A1.P – NiCr.Dic apresentou valor médio intermediário aproximado de 1,03% em relação as demais amostras, com variações de máximos e mínimos de 2,15% e 0,7%, respectivamente. No caso da amostra A1.P – NiCr.Dic esta apresentou uma média de aproximadamente 2,23% com variações de máximos e mínimos de 3,21% e 1,25%, respectivamente, sendo, portanto, o percentual mais elevado de defeitos dentre as amostras analisadas.

O Gráfico da Figura 32 apresenta a distribuição dos percentuais de defeitos das três amostras (A1.E – NiCr.Dic,A1.P – NiCr.Dic,A4.E – NiCr.Cre), obtidos do processamento de imagens.

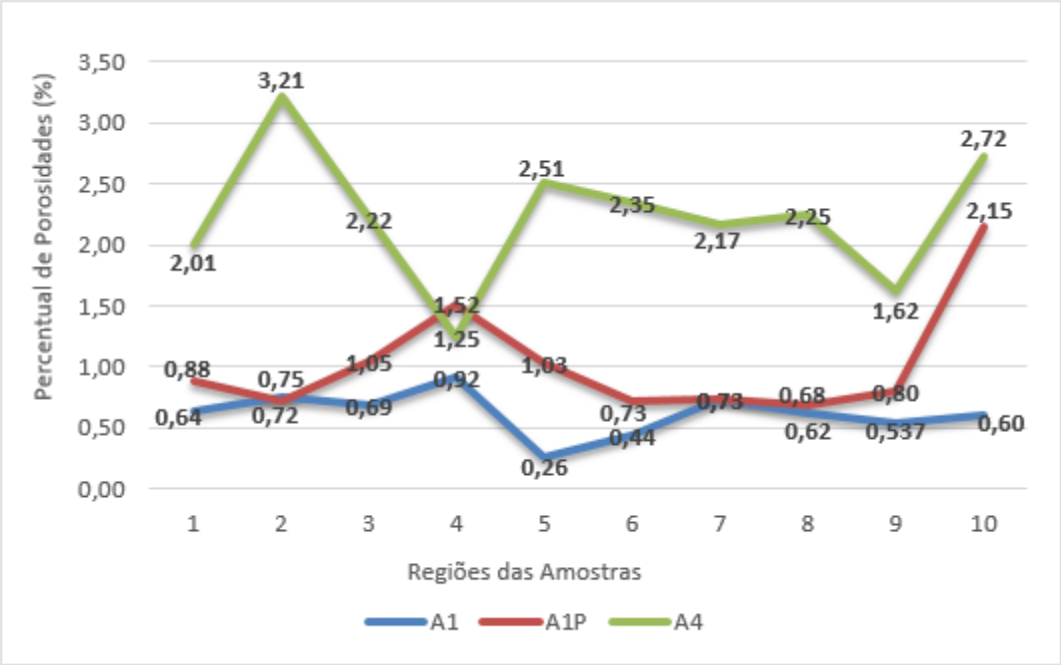


Figura 32 – Gráfico da distribuição dos percentuais de defeitos das amostras A1.E - Dic, A1.P - Dic e A4.E – Cre.

O desvio padrão encontrado na amostra A1.E – NiCr.Dic foi de 0,17%, na amostra A1.P – NiCr.Dic foi de 0,44% e na A4.E – NiCr.Cre 0,52%. Comparando as diferenças de desvio padrão entre as amostras A1.E – NiCr.Dic e A1.P – NiCr.Dic foi de 0,27%, entre A1.E – NiCr.Dic e A4.E – NiCr.Cre foi de 0,35%. Já a menor diferença de desvio padrão encontrada foi entre A1.P – NiCr.Dic e A4.E – NiCr.Cre que foi de 0,08%.

As variações dos resultados obtidos se devem a vários fatores externos que vão desde aos parâmetros de aspersão térmica, a liga de revestimento utilizada, presença do selante e a técnica de medição de defeitos [49]. Analisando os dois tipos de selantes utilizados nessas amostras que foram o Selante S2 e o Selante S1, observa-se que a amostra A1.E – NiCr.Dic apresentou melhores resultados em relação as outras amostras, devido a boa capilaridade do selante Selante S2, em comparação ao selante Selante S1.

Isso se deve as propriedades químicas distintas dos selantes, que foram apresentadas na Tabela 8. Selantes a base de fenol e epóxi apresentam excelente penetração nos espaços vazios, contribuindo para reduzir a porosidade. Enquanto, os selantes a base de copolímero e com aditivos como o Selante 2, por exemplo, são de grande eficácia em vedar macroporosidades internas, possuindo características não

adesivas (similares aos os selantes de politetrafluoretileno, PTFE) e características como a capacidade de melhorar as propriedades e reduzir a densidade (similares aos selantes que possuem aditivos de carbonato de cálcio, PCC) ou aditivos de nanocarbonato de cálcio (NPCC). Logo o Selante S2 é de alta capilaridade e não precisa usar diluente, pois, de acordo com as suas propriedades, são de baixa viscosidade [46].

Apesar de mais caro, selantes com base em copolímero como o Selante S2 são uma boa alternativa em comparação aos tradicionais selantes à base de epóxi como o S1 , sendo a amostra A1.E – NiCr.Dic foi a que apresentou os melhores resultados de percentuais de defeitos.

As disparidades entre os percentuais de defeitos das amostras A1.E – NiCr.Dic e A1.P – NiCr.Dic, se comparados à amostra A4.E – NiCr.Cre, divergem por causa dos motivos já explicados acima e também tem a influência da forma geométrica, onde a amostra A4.E – NiCr.Cre, por exemplo, é do tipo eixo que costumam gerar percentuais elevados de defeitos em relação às amostras no formato de placa.

Porém, percebe-se que mesmo sendo do tipo eixo a amostra A1.E – NiCr.Dic apresentou o menor percentual de defeitos se comparadas às outras amostras, logo é perceptível a influência positiva do selante Selante S2, que é do tipo copolímero e possui uma capilaridade excelente, pois ajudou a reduzir os percentuais de defeitos em relação a amostra A1.P – NiCr.Dic, por exemplo, que é do tipo placa e utilizou do mesmo tipo de selante. Já na amostra A4.E – NiCr.Cre, o selante Selante S1 não influenciou na redução na quantidade de defeitos.

No caso das amostras A1.E – NiCr.Dic e A4.E – NiCr.Cre, a diferença do percentual de defeitos das médias aritméticas entre elas é de 1,61%, tal diferença entre as amostras ocorre, porque a amostra A4.E – NiCr.Cre apresenta uma camada de óxido entre o revestimento e o substrato, que é bastante prejudicial tornando o revestimento suscetível a desprendimento do substrato e de um modo geral apresenta uma quantidade maior de defeitos do que a amostra A1.E – NiCr.Dic.

A amostra A1.P – NiCr.Dic apresentou também uma camada de óxido entre o revestimento e o substrato, porém em menor quantidade do que apresenta na amostra A4.E – NiCr.Cre, e isso pode ter ocorrido devido ao preparo da superfície não ter sido feito de maneira correta.

A seguir, nas Figuras 33, 34 e 35, são mostrados os melhores resultados encontrados em termos de menores percentuais de porosidade para cada região de cada amostra. As superfícies circundadas em amarelo nas regiões mais escurecidas são as porosidades encontradas nas regiões analisadas.

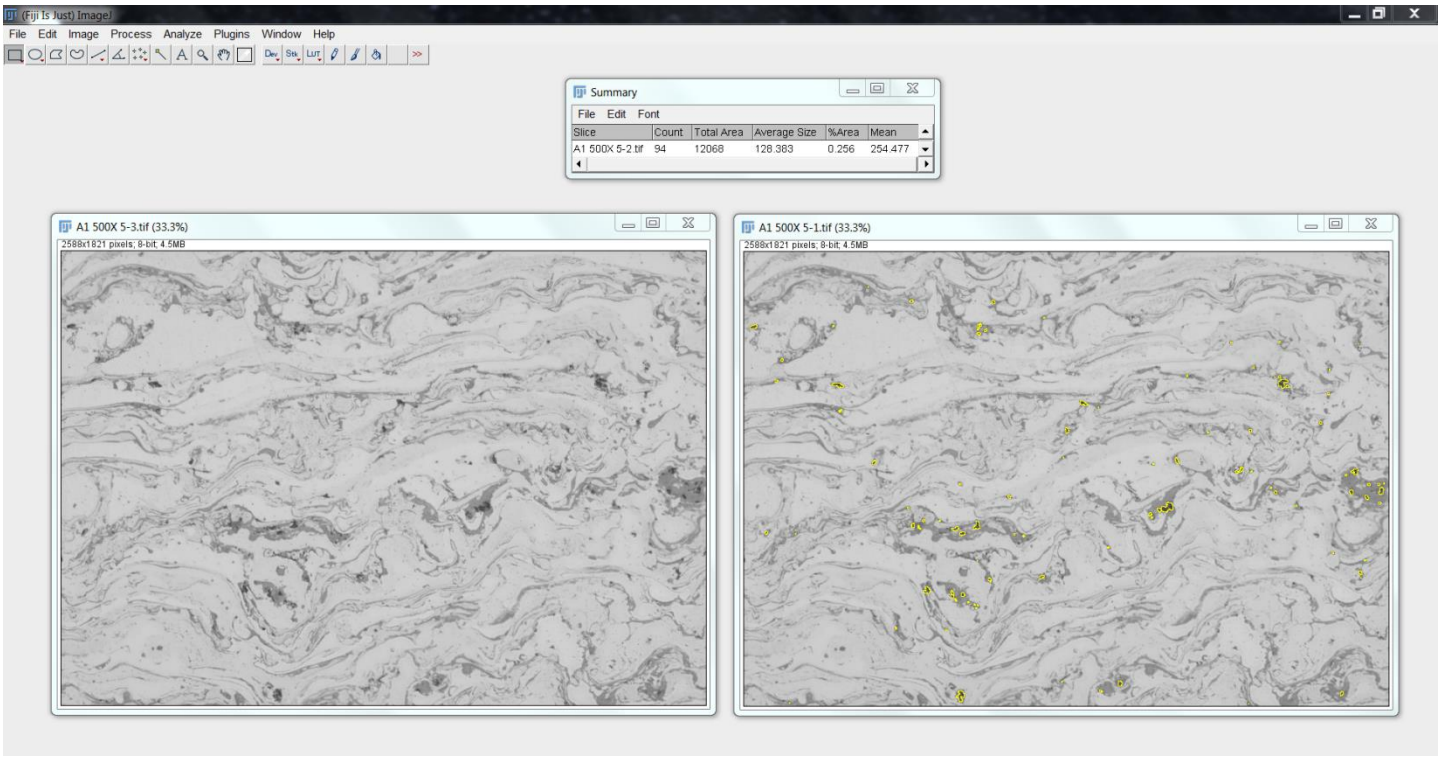


Figura 33 – Aspecto microestrutural da região da amostra A1 500x – 10 (A1.E – NiCr.Dic) com 0,26% de defeitos.

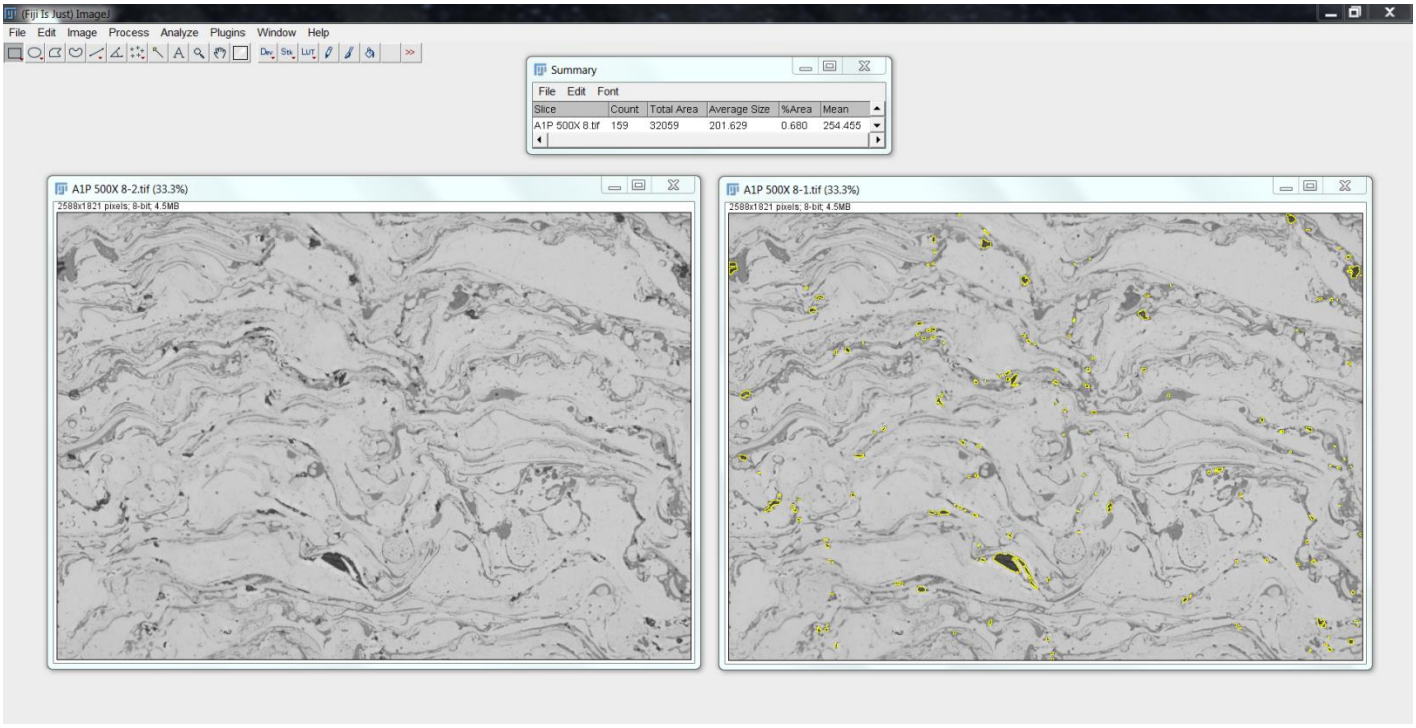


Figura 34 – Aspecto microestrutural da região da amostra A1P 500x – 8 (A1.P – NiCr.Dic) com 0,68% de defeitos

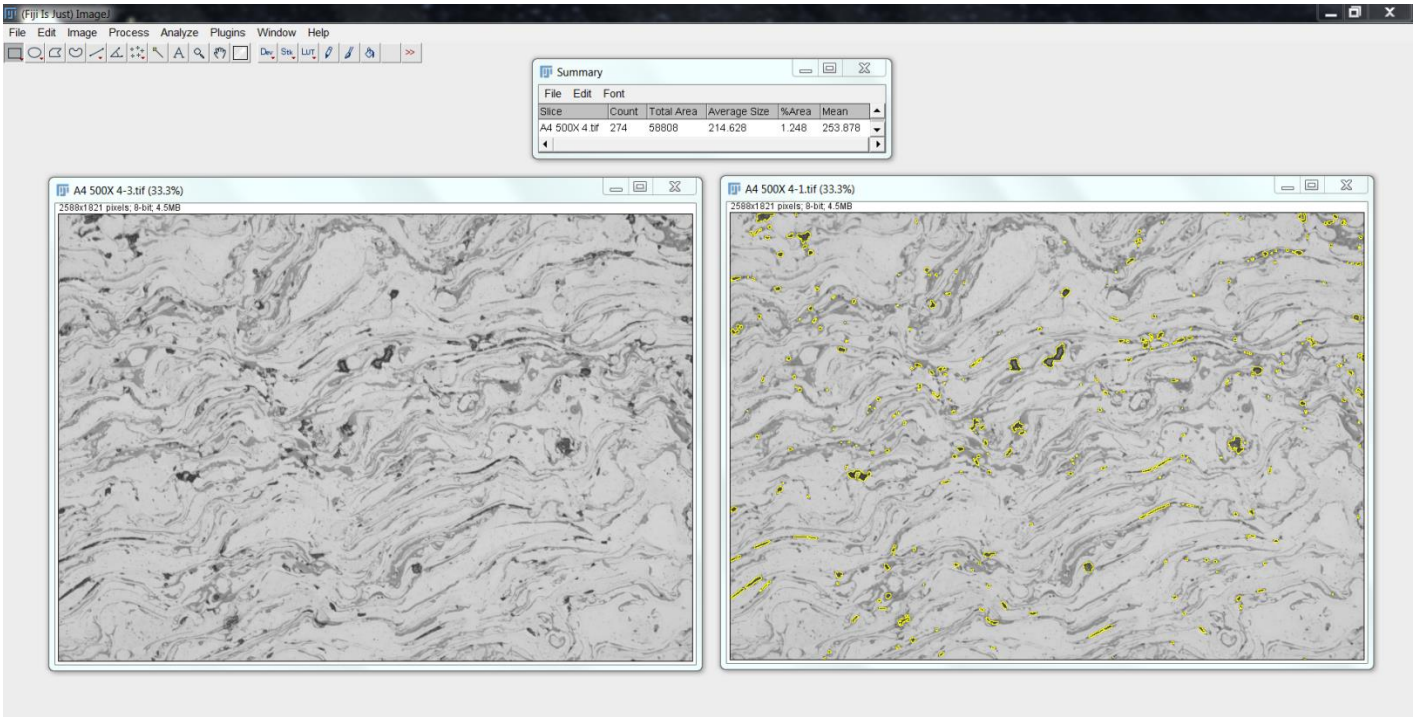


Figura 35 – Aspecto microestrutural da região da amostra A4 500x – 4 (A4.E – NiCr.Cre) com 1,248 % de defeitos.

Na Tabela 18 teremos o comparativo entre os resultados obtidos neste trabalho com os resultados obtidos em outros trabalhos e na literatura:

Tabela 18 – Comparativo de percentual de defeitos com outros trabalhos

Autor	**Média de porosidades de todas as condições (%)**	**Intervalo de médias das condições das porosidades (%)**	**Software**	**Processo**	**Revestimento**
Trojan et. al. (2015)	3,70%	Entre 3,59% e 3,81%	FIJI Image	Arco elétrico	Fe-Cr-Ni e Fe-Co-Cr-Ni
Pinheiro (2017)	2,41%	Entre 1,60% e 3,22%	FIJI Image	Arco elétrico	Cr-Ni-Mn
Neste trabalho (2018)	**1,29%**	**Entre 0,25% e 3,21%**	**FIJI Image**	**Arco elétrico**	**Fe-Cr-Ni e Fe-Co-Cr-Ni**

Os trabalhos acima utilizaram o mesmo processo de aspersão térmica, amostras com condições de revestimento semelhantes e o software FIJI Image de processamento de imagens para avaliação dos percentuais de defeitos .

Observando os resultados de Pinheiro [46] e Trojan *et al.* [49] percebemos que apesar das variações de critérios de quantificação de defeitos, os intervalos das médias de porosidades dentre as condições se encontram em intervalos próximos.

No trabalho de Pinheiro [46] obtevesse um intervalo de 1,60% e 3,22% e Trojan *et al.* [49] um intervalo de 3,59% e 3,81%, que são percentuais de defeitos consideráveis, enquanto que neste trabalho o intervalo foi entre 0,25% à 3,25%, considerado um dos menores percentuais de porosidades, se comparados com os trabalhos dos autores indicados na Tabela 18.

Dentre os fatores envolvidos, podemos destacar como sendo os de principal influência a composição do material do revestimento, forma geométrica do corpo de prova e a condição durante o processo aspersão térmica, que podem ser benéficos ou não a qualidade do revestimento [24].

A técnica de PDI possibilitou uma quantificação mais precisa de defeitos em aspersão térmica se comparadas com outras técnicas, como contagem de pontos. O grande desafio é distinguir os diversos tipos de defeitos (poros, microtrincas, redes de óxidos) existentes nos revestimentos aspergidos.

4.4 Ensaio de Microdureza

Ao todo foram realizadas 6 medições por coluna, sendo uma medida na interface, uma medida no substrato e as outras 4 medições foram realizadas no revestimento na amostra A1.P – NiCr.Dic.

A Tabela 19 mostra todas as medições, porém a média global leva em consideração somente as medições no revestimento, portanto são apresentadas as 6 medidas distribuídas em 3 colunas cada, para a amostra A1.P – NiCr.Dic, com seus respectivos mínimos e máximos, médias, desvio padrão e média global.

Tabela 19 – Medições de Microdureza Vickers HV 300, médias e desvio padrão na amostra A1.P – NiCr.Dic.

Indentação →	**1ª Coluna**			**2ª Coluna**			**3ª Coluna**		
Amostra 1P ↓	**HV0.3**	**D1**	**D2**	**HV 0.3**	**D1**	**D2**	**HV 0.3**	**D1**	**D2**
1 (Substrato)	132,1	63,97	65,81	197.9	51,63	54,41	169,7	57,50	57,70
2 (Interface)	237,2	50,46	53,19	211,4	51,98	50,61	135,4	62,09	65,99
3 (Revestimento)	237,2	48,95	47,90	363,1	39,14	39,14	312,3	42,09	42,32
4 (Revestimento)	367,7	39,37	38,42	488,1	33,76	33,76	485,1	33,42	34,31
5 (Revestimento)	231,2	45,22	52,89	371,5	37,98	39,42	322,4	39,40	43,68
6 (Revestimento)	414,7	36,25	36,25	340,0	38,34	42,56	410,8	37,24	36,36
Mínimo	231,2			340,0			312,3		
Média	312,7			390,7			382,7		
Máximo	414,7			488,1			485,1		
Desvio Padrão	80,3			57,4			70,5		
Média Global	**362,0**								

* Média de Microdureza Vickers no substrato: 192,9 HV_{300}.

A partir dos resultados obtidos, observou-se que o revestimento da amostra A1.P – NiCr.Dic apresentou valores de microdureza superior aos da média do substrato de 192,9 HV_{300}, com mínimo e máximo de 231,2 HV_{300} e 488,1 HV_{300}, respetivamente, e média global de 362,0 HV_{300} e desvio padrão de ±35.02.

Comparando os valores do substrato com os valores do revestimento, percebe-se um aumento da dureza e isso demonstra os benefícios adquiridos pelo processo de revestimento de materiais metálicos através da aspersão térmica em termos de dureza.

A Figura 36 apresenta as microscopias ópticas obtidas após o ensaio de microdureza realizado com todas as medições realizadas, as 6 indentações por coluna contabilizando de baixo para cima.

- Amostra A1.P – NiCr.Dic - Placa com Selante S2

Na amostra A1.P – NiCr.Dic a média global de microdureza foi de 362,0 HV, com mínimo e máximo de 231,2 HV e 488,1 HV respetivamente e desvio padrão de ±35.02.

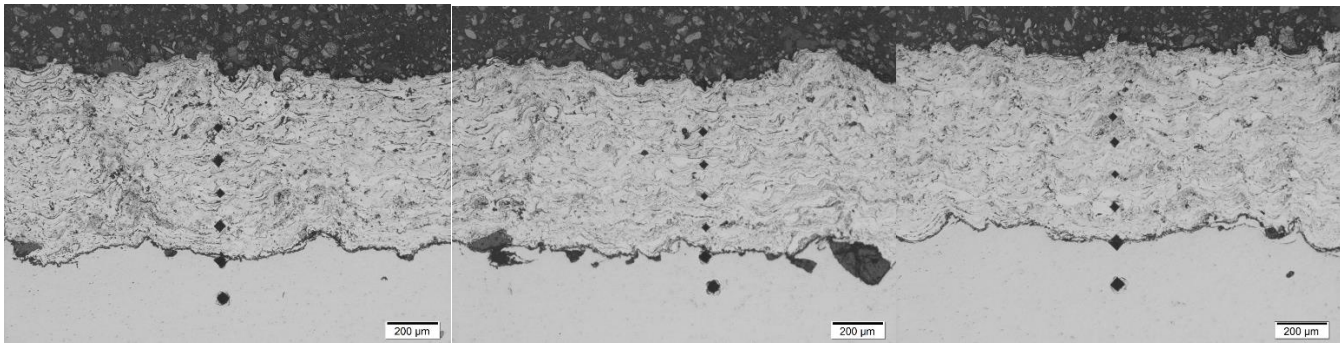


Figura 36 – Aspecto microestrutural das indentações na 1ª, 2ª e 3ª Colunas da região da amostra A1.P – NiCr.Dic, respectivamente.

O Gráfico 2 apresenta a distribuição das medições de microdureza nessas três colunas das amostras na Figura 37.

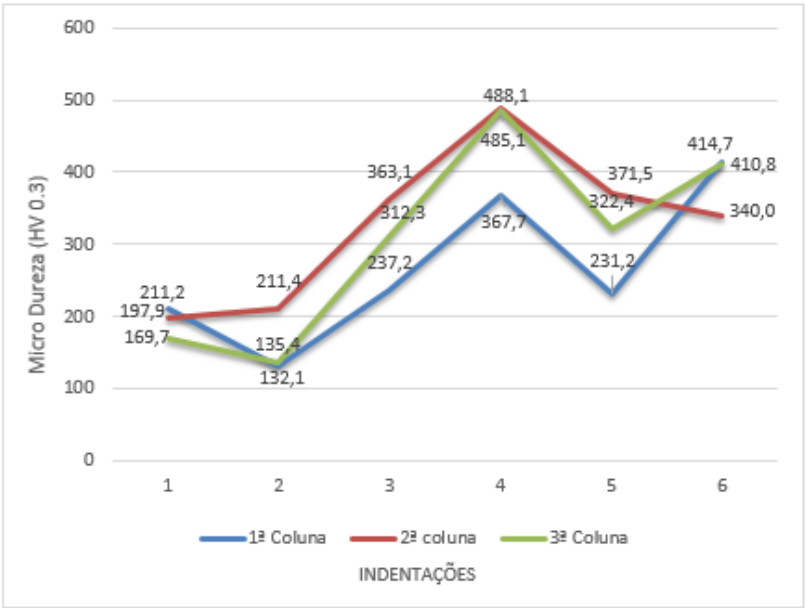


Figura 37 – Gráfico da distribuição das medições de microdureza nas três colunas do revestimento da amostra A1P

No Gráfico apresentado na Figura 36 é possível observar o aumento da dureza ao longo do revestimento nas quatro medições distribuídas em cada uma das três colunas, se comparadas com as medições no substrato e interface entre substrato e revestimento. Observa-se que a segunda medição no revestimento aumentou a dureza em relação a primeira medição no revestimento, e a terceira medição no revestimento (3ª Medição) aumentou em relação a segunda medição no revestimento e a quarta medição aumentou a dureza em relação a terceira medição. Esse comportamento entre a primeira e a segunda medição no revestimento em cada coluna da amostra, se repetiu ao longo do revestimento nessas três colunas.

Algumas variações entre as medições de microdureza no revestimento de uma forma geral na Amostra A1.P – NiCr.Dic provavelmente podem ocorrer devido a alguns possíveis fatores como, a medição ter sido realizada em pontos de elevada dureza ou em pontos com a presença de óxidos e inclusões, presença de porosidade e as medições terem alcançando espessuras distintas, além da influência dos parâmetros do processo de aspersão no revestimento que acabam por refletir no resultado do ensaio de microdureza também, por isso as discrepâncias entre as medições.

A fim de evitar essas diferenças discrepantes entre as medições realizadas que podem ocorrer quando os penetradores se posicionam sobre as crateras ou picos de rugosidade, que costumam existir na amostra, o trabalho de Pollnow [17] e Lima [76] sugerem que é necessário usinar ou esmerilhar a amostra a ser analisada antes da realização do ensaio.

De um modo geral, o aumento de dureza no revestimento, em relação ao substrato, é o objetivo a ser alcançado pelo processo de aspersão térmica, sendo que em alguns processos de aspersão térmica é possível aumentar ainda mais esses valores, porém cada processo tem prós e contras e têm de ser avaliar a melhor opção. Segundo Pollnow [17], os processos por Arco Elétrico normalmente mantem os valores de dureza entre 345 a 392 HV (35 - 40 Rc) e outros processos como o por HVOF conseguem fornecer valores ainda maiores, algo em torno de 595 a 1354 HV (55 -100 Rc) para materiais não ferrosos [46, 17].

Analisando os trabalhos de Freitas [24], Pinheiro [46] e Brito [50], todos utilizaram o mesmo processo de aspersão térmica e condições de revestimento semelhantes, além do mesmo tipo de Ensaio de microdureza Vickers. Na Tabela 20 é demonstrado o comparativo entre os resultados obtidos neste trabalho com os resultados obtidos em outros trabalhos e na literatura.

Tabela 20 – Comparativo de Microdureza com outros trabalhos

Autor	Média Global de Microdureza (HV_{300})	Processo	Revestimento
Brito (2010) [50]	453,5	Arco elétrico	Ni-Al, Ni-Cr-Si-Fe
Freitas (2015) [24]	491,2	Arco elétrico	AISI 309L T1 e AISI 410 NiMo, Fe-Co-Cr-W, Fe-Cr-Ni-B
Pinheiro (2017) [46]	302,0	Arco elétrico	Cr-Ni-Mn
Neste trabalho (2018)	**362,0**	**Arco elétrico**	**Fe-Cr-Ni e Fe-Co-Cr-Ni**

O ensaio de microdureza mostrou que o revestimento apresentou um nível de dureza considerado elevado, se comparado a média do substrato, entretanto, percebe-se que ocorre uma oscilação de dureza ao longo da espessura do revestimento. Esse resultado era esperado, visto que a microestrutura é heterogênea e irregular.

5 Conclusões

Com o presente trabalho foi possível observar que a partir do processo de aspersão térmica a arco elétrico foi possível gerar revestimentos com uma microestrutura predominantemente lamelar, uniformidade na espessura, elevada resistência mecânica e baixo percentual de defeitos (porosidades, óxidos e microtrincas) na camada aspergida para todas as condições de revestimentos metálicos analisados.

A partir das micrografias geradas por microscopia ótica (MO) nos revestimentos de Liga de NiCr, a amostra em formato de placa e com aplicação de selante copolímero foi a que apresentou o menor percentual de defeitos, em torno de 0,62%. A influência de fatores como a liga utilizada, as características do processo de aspersão térmica a que foram submetidas, forma geométrica e ao tipo de selante também influenciam neste percentual.

A utilização da técnica de PDI (processamento digital de imagem) permitiu uma avaliação mais criteriosa na quantificação de defeitos nos revestimentos estudados e indicou que em todas as condições os percentuais de defeitos foram inferiores aos sugeridos pela literatura, indicando a excelente qualidade dos revestimentos.

Os resultados do ensaio de aderência, onde foram avaliados revestimentos de liga de CoCr e liga de NiCr, mostram resultados satisfatórios em termos de aderência sendo que a condição que utilizou a liga NiCr foi a que apresentou a maior resistência a tração de 21MPa, com adesão média global de 17,93MPa. Os valores em geral foram satisfatórios e estão de acordo com o recomendado, segundo a norma exigida para ensaios de aderência que é de 10MPa.

Os resultados obtidos no ensaio de microdureza Vickers se mostraram satisfatórios, com média global de 362,0 HV, superior aos da média do substrato de 192,9 HV. Este aumento da dureza indica os benefícios adquiridos com a utilização de revestimentos metálicos.

6 Sugestão para trabalhos futuros

- Utilizar outros processos de aspersão térmica sob as mesmas condições das amostras comparar com os resultados deste trabalho.
- Realizar ensaio de corrosão de névoa salina e polaridade em ambas nas placas para comparar.
- Utilizar outros programas de processamento de imagens a fim de comparar os resultados.
- Utilizar a técnica de difração de raios-x para quantificar os diversos tipos de óxidos e elementos de liga nos revestimentos estudados.
- Realizar o ensaio de aderência com uma amostragem maior, a fim de se obter um resultado mais preciso.
- Simular o ensaio de aderência (*Pull-Off*) e analisar seu comportamento e resultados, através do método de elementos finitos.
- Identificar e separar os defeitos já encontrados das amostras analisadas em quantidade e percentuais de poros, óxidos, microtrincas e partículas não fundidas.
- Avaliar a microestrutura das amostras através da microscopia de Varredura (MEV) e quantificar os percentuais de defeitos e compará-los entre si e com os resultados já obtidos por MO.
- Avaliar o ensaio de microdureza relacionando-o também com a espessura do revestimento ao longo das amostras.
- Utilizar a técnica de aplicação do selante a vácuo que proporcionará uma deposição uniforme nos revestimentos.
- Realizar a avaliação dos selantes utilizados sob os revestimentos, quanto a influência das suas propriedades químicas na microestrutura e capacidade de penetração no substrato e revestimento.
- Analisar a resistência adesiva nos revestimentos estudados, antes e após do ensaio de corrosão.
- Usar a ferramenta de “Stacks” no processamento de imagens como forma de analisar as seções transversais dos defeitos, utilizando imagens obtidas em profundidades pré-definidas, como um primeiro passo para traçar um perfil 3D dos defeitos.

7 Referências Bibliográficas

1. **SIEGMANN, S., ALBERT, C.;** "100 years of thermal spray: About the inventor Max Ulrich Schoop"; Surface & Coatings Technology; v. 220; pp. 3-13; November 2012. .
2. **NUNES, L. P., LOBO, A. C. O.** Pintura Industrial na Proteção Anticorrosiva; 4ª edição, Rio de Janeiro, Interciência Editora, 2014.
3. **Brandolt. Cristiane de Souza**.2014. Revestimentos de Níquel e Cobalto Aplicados por Aspersão Térmica por Chama Hipersônica (HVOF) em Aço API 5CT P110. Porto Alegre.2014
4. **Bezerra B. S. L.** Estudo para prevenção de falhas de hastes de Bombeio de petróleo através de aplicação de Revestimento NiCr. Dissertação. Universidade Tiradentes. Aracaju. 2007.
5. **Javadi M. M., Edris H., Salehi M**. Plasma Sprayed NiAl Intermetallic Coating Produced with Mechanically Alloyed Powder. J. Mater. Sci. Technol., 27(9), 816-820. 2011.
6. **Verdian M. M., Raeissi K., Salehi M**. Characterization and electrochemical properties of Ni(Si)/Ni5Si2 multiphase coatings prepared by HVOF spraying. Applied Surface Science 261, 493– 498. 2012.
7. **ASM INTERNATIONAL** - Metals Handbook - vol 2 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials ASM Int., 1992.
8. **Lison D**. Handbook on the Toxicology of Metals. Academic Press, Inc. 2007.
9. **Xi X., Nie Z., Xu K., Ma L., Chen G., Zhang X., Zuo T**. Structure and properties of secondary cobalt powder. Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials 41 90 – 93. 2013.
10. **Ladeira L. W. A.** Conjugados Duplex de WC-Co/NiCrAl ou NiCr, processados por aspersão térmica, para aplicações em meios corrosivos e/ou desgaste. Dissertação. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2000.
11. **Riggs, W. L., Crawmer, D.**, Plasma spray booth equivalency, thermal spray research and applications, Proceedings of Third National Thermal Spray Conference, Long Beach, CA, USA, p. 465-484, 1990

12. **ASM INTERNATIONAL** - Metals Handbook - vol 5 – Surface Engineering - Purpose Materials ASM Int., 1992.
13. **Souza C.R., Voorwald C.J.H, Nascimento P.M., Pigatin L.W**. Avaliação da Resistência à corrosão e do comportamento em fadiga do aço ABNT 4340 revestido com WC-12Co e WC-17Co aplicados por HVOF e eletrodepositado com cromo duro. 2000.
14. **Panossian, Z.** Revestimentos múltiplos. Tratamento de Superfície, São Paulo, n. 84, p. 34-55, 1997.
15. **Bolles, D. C.** HVOF thermal spraying: and alternative to hard chrome plating, Welding Journal, October, p. 31-34. 1995.
16. **Leeg, K. O.** Economically Viable Hard Chromium Alternatives. Plating & Surface Finishing, Jul., p. 12-4, 1996.
17. **Pollnow, Edison Nunes**, "Aspersão Térmica - Um Método Limpo e Eficiente para a Substituição do Cromo Duro", Rijeza Indústria Metalúrgica, São Leopoldo, Rio Grande do Sul, Publicada em 27 de junho de 2013.
18. **Morillas, J.D**. Aplicação de dissolução anódica para avaliação de descontinuidades em revestimentos de cromo duro. Curitiba-PR. (2005).
19. **Wang, G.X, Jiang, X. and Sampath, S. ed. Seal, S., Dahotre, N.B., Moore,J.J., & Mishra, B.** Surface Engineering in Materials Science I. The Minerals, Metals & Materials Society, (2000).
20. **Clare, J.H. & Crawmer, D.E.** Thermal spray coating. In: Metal Handbook.Volume 5 Surface cleaning, finishing, and coating. ASM, Metals Park, Ohio.361- 374, (1994).
21. **Vardelle, M., Vardelle, A., Leger, A.C., Fauchais, P., & Gobin, D**. 1995. Journal Thermal Spray Tech. 4. 50-58. (1995).
22. **Grainger, S.** Engineering Coatings – Design e Aplication. Abington, Abington Publishing, (1989)
23. **Pawlowski, Lech.** The science and engineering of thermal spray coatings, Second Edition, Wiley, (2008).
24. **Freitas, Bruno Cavalcante**. 2015. Estudo das propriedades microestruturais de ligas de níquel cromo e cobalto-cromo obtidas pelo processo de metalização a arco elétrico Dissertação de mestrado, CEFET-RJ. Rio de Janeiro: s.n., (2015).
25. S**iegmann, S., Albert, C.** "100 years of thermal spray: About the inventor Max Ulrich

Schoop"; Surface & Coatings Technology; v. 220; pp. 3-13; November 2012.

26. **Berndt, C. C., Bernecki, T. et.al**; Handbook of Thermal Spray Technology; 1ª edição, Ohio, ASM International, 2004.
27. **Kejelin, N. Z.; Roedel, R.; Pereira, A. S.; Pamplona, A. S.; Buschinelli, A. J.** "Aplicação da Aspersão Térmica e da soldagem TIG com alimentação de arame para o revestimento de aços C-MN com ligas a base de Níquel"; VI Congresso nacional de Engenharia Mecânica, Paraíba, Brasil, Agosto 2010.
28. **Antunes, Fernando José.** 2013. Avaliação da Adesão e da Resistência à Corrosão de Revestimentos de Cr e Co obtidos através da técnica de Aspersão Térmica. Rio de Janeiro: s.n., (2013).
29. **Thorpe, M.L.** Thermal Spray – Industry in trandsition. Advanced materials & processes, v.143, n.5, p.50-61.1993.
30. **Padilha, Hélio.** "Estudo sobre revestimentos depositados por aspersão térmica para melhorar o desempenho de conexões elétrica", Universidade Federal do Paraná, Paraná – SC, Brasil,2005
31. **Lima, C.C.** TREVISAN, R.; Aspersão Térmica Fundamentos e Aplicações; 2ª edição; São Paulo, Editora Artliber, 2007.
32. **Khalil, A. M. V**.; Estudo do Processo de Aspersão Térmica a Plasma para Deposição De Titânio; Dissertação de Mestrado; PIPE/UFPR, Curitiba, PR, Brasil, 2009.
33. **Novicki, Nilceu.** 2008. Aplicação da Aspersão Térmica na Soldagem em operação de tubulações com pequena espessura remanescente. Florianópolis: s.n., 2008.
34. **Cortés, R.S.**, 1998, Estudos de Revestimentos de Alumínio Depositados por três Processos de Aspersão Térmica para a Proteção do Aço contra a Corrosão Marinha, tese de Dr. Eng°., UFSC, Florianópolis, SC, Brasil.
35. **Fukanuma, H, And N. Ohno.** 2004. A study of adhesive strength of cold spray coatings Thermal Spray 2004: Advances in Technology and Applications 329-334. Materials Park, ASM International.
36. **Balić, Edin E. Mousab Hadad, Partha P. Bandyopadhyay, And Johann Michler**. 2009. Fundamentals of adhesion of thermal spray coatings: adhesion of single splats. Acta Materialia 57:5921–5926.
37. **Houben, J. M.** Future developments in thermal spraying. Thermal Spray Coatings – New Materials, Processes and Applications. Proceedings of the 2nd National

Conference on Thermal Spray, p.1-20, OH, 1984.

38. **Krepski, R. P.** Coating applications in the chemical process industries. USA: Materials Technology Institute of the Chemical Process Industries, 1993.
39. **Esfahani, E. A., Salimijazi, H., Golozar, M. A., Pershin, L.,** "Study of Corrosion Behavior of Arc Sprayed Aluminum Coating on Mild Steel", Journal of Thermal Spray Technology, v. 21, n. 6, pp. 1195-1202, December 2012.
40. **Zaat, J. H.** 1983. A quarter of a century of plasma spraying. Animal Reviews. 1983.
41. **Pershin, V., et al**. 2002. Effect of Substrate Temperature on Adhesion Strength of Plasma-Sprayed Nickel Coatings. ASM International. 2002.
42. **Paredes, Ramón S. Cortés.** Aspersão Térmica. Apostila Curso Aspersão Térmica. UFPR, Curitiba (2012).
43. **Sobolev, V.V., Guilemany, J.M. e Calero, J.A.** 2000. Development of Coating Structure and Adhesion During High Velocity Oxygen-Fuel Spraying of WC-Co Powder on a Copper Substrate. Journal of Thermal Spray Technology. 2000.
44. **Vreijling, M.P.W**. "Electrochemical Characterization of Metallic Thermally Sprayed Coatings". Ph.D. Thesis, TNO Institute of Industrial Technology, Delft, Netherlands,1998.
45. **Menezes, D. D.**; Avaliação da Resistência à Corrosão de Revestimentos de Alumínio aplicados pelas técnicas de Arco Elétrico e Chama Convencional em meio cloreto, Tese de Doutorado; UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
46. **Pinheiro, R. N.** Avaliaçâo Da Liga Cr-Ni-Mn Usada Como Revestimento E Obtida Pelo Processo De Aspersão Térmica, 2017.
47. **Freire, F.** Avaliação de revestimentos aplicados por aspersão térmica para proteção contra o desgaste de ponteiras de "Risers". Florianópolis SC; FEM, UFSC, 2002. Dissertação de mestrado – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 64p. 2002.
48. **Deshpande, S.; Sampath, S.; Zhang, H.;** "Mechanisms of oxidation and its role in microstructural evolution of metallic thermal spray coatings - Case study for Ni-Al"; Surface & Coatings Technology, v. 220, n. 12, pp. 5396-5406, October 2006.
49. **Trojan, Julia Coelho; Bonaldo, Julia Cristina Guimarães De Carvalho**, Projeto de Graduação: Análise das características mecânicas e microestruturais de revestimentos de níquel obtidos por aspersão térmica, CEFET RJ, Novembro de 2015.

50. **Brito, V. R. S**.; Caracterização de Revestimentos Metálicos Aspergidos Termicamente por Arco Elétrico; Dissertação de Mestrado; CEFET, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
51. **Terres, Cristhian José Ferreira**. 2006. Avaliação de Revestimentos de Aços Inoxidáveis Depositados por aspersão Térmica. Curitiba: s.n., 2006.
52. **Marques, Paulo Villani**, Informação Técnica Infosolda Aspersão Térmica, Universidade federal de Minas Gerais, Engenharia Mecânica, 2003.
53. **Limar, Carlos; Camello, Roberto**, Revestimentos para Barreira Térmica: Evolução e Perspectivas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UNIMEP, Santa Bárbara, São Paulo, 2014.
54. **Stern, M., Geary, A.L**., "Eletrochemical Polarization – A Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves", Journal of the Eletrochemical Society, v. 104, n. 1, pp 56- 63, Janeiro 1957.
55. **Thermal Spray Coatings**. Disponível em: <http://www.corrosion.com/thermal-sec6.html>, Acesso em 13/11/2014
56. **VGK Engenharia**, Comunicação Interna.
57. **Carneiro, D. R. M.** 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, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2016.
58. **Norma Petrobras N-2568**. Revestimentos Anticorrosivos Aplicados por Aspersão Térmica, Maio 2011.
59. **ASTM D-4541** - Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers, (2002).
60. **Rodolpho C. D.Pereira, Jeferson Leite Oliveira, Walter Andrade de Souza, Bruno Pacheco Silva, Isabel Cristina P. Margarit Mattos**. Medidas de Aderência pelo Método Pull-Off - Aspectos Práticos Não Abordados em Norma, Escola Politécnica, COPPE, UFRJ, Encontro e Exposição Brasileira de tratamento de superfície III INTERFINISH Latino Americano, (2012).
61. **Tiago Ferreira, Wayne Rasband.** ImageJ User Guide (2002)
62. **Alves, Haimon Diniz Lopes**. Análise da porosidade de sedimentos geológicos usando a técnica de microtomografia computadorizada, Dissertação de mestrado, UFRJ, (2012).
63. **M.S.d.R.Uirá** - Quantificação de Defeitos por Processamento Digital de Imagens em

Revestimentos obtidos por Aspersão Térmica, Dissertação de mestrado, UERJ, (2016).

64. **Sidnei Paciornik, Marcos Henrique de Pinho Maurício.** Digital Imaging. 2004. Rio de Janeiro: Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. (2004).
65. **Sousa, Luciana Ferreira**. Aquisição, Processamento e Análise de Imagens 3D: MicroTC e FIB-SEM na Caracterização de Defeitos em Solda Molhada, Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica, (2014).
66. **Dias da Silva, Marcio.** Projeto de Graduação: Qualificação do Processo de Aspersão Térmica de Produtos para Aplicação Petroquímica, Universidade Federal de Santa Catarina, (2009).
67. **G. Marot, Ph. Démarécaux, J. Lesage, M. Hadad, St. Siegmann, M.H. Staia.** The interfacial indentation test to determine adhesion and residual stresses in NiCr VPS coatings. Journal Surface and Coatings Technology (2008).
68. **ISO 6507 Metallic materials - Vickers hardness test** - Part 1: Test method - Part 2: Verification of testing machines - Part 3: Calibration of reference blocks. 1997.
69. **M. F. O.; Buschinelli, A. J. A., Gartner, F., Kirsten, A., Voyer, J., Kreye, H.;** "Influência de Parâmetros de Processo na Qualidade de Revestimentos de Aço X46Cr13 Aspergidos Termicamente", ABCM, 2° COBEF, Urbelândia, MG, Brasil, Maio 2003
70. **Schiefler, M. F. O. Buschinelli, A. J. A., Gartner, F., Kirsten, A., Voyer, J., Kreye, H**.; "Influência de Parâmetros de Processo na Qualidade de Revestimentos de Aço X46Cr13 Aspergidos Termicamente", *ABCM, 2° COBEF*, Urbelândia, MG, Brasil, Maio 2003.
71. **Norma Brasileira ABNT NBR – 15877** - Pintura industrial — Ensaio de aderência por tração. 2010.
72. **Malek, Muhamad Hafiz Abd, et al**. Performance and Microstructure Analysis of 99.5% Aluminium Coating by Thermal Arc Spray Technique. ScienceDirect. 2013.
73. **P.G.Thiem, A.Chornyi, I.V.Smirnov, M.Krüger.** Comparison of microstructure and adhesion strength of plasma, flame and high velocity oxy-fuel sprayed coatings from an iron aluminide powder. Volume 324 - Páginas 498-508. ScienceDirect.2017.
74. **Wen Sun, Adrian Wei Yee Tan, Iulian Marinescu, Wei QuanToh, Erjia Liu**. Adhesion, tribological and corrosion properties of cold-sprayed CoCrMo and Ti6Al4V

coatings on 6061-T651 Al alloy. Volume 326, Part A, Páginas 291-298.2017.

75. **Ribeiro, Amanda Gonçalves.** "Medidas de dispersão: variância e desvio padrão"; *Brasilescola*.< https://brasilescola.uol.com.br/matematica/medidas dispersao-variancia-desvio-padrao.htm>. Acesso em 23 de maio de 2018.
76. **Lima, Carlos Roberto Camello; Trevisan, Roseana Da Exaltação**, "Ensaio de Adesão em Revestimentos Metal-Cerâmicos Obtidos por Aspersão Térmica a Plasma", 1999.