CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

ESTUDO DAS PROPRIEDADES MICROESTRUTURAIS DE LIGAS DE NÍQUEL-CROMO E COBALTO-CROMO OBTIDAS PELO PROCESSO DE METALIZAÇÃO A ARCO ELÉTRICO

Bruno Cavalcante Freitas

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

Orientadores:

Hector Reynaldo Meneses Costa, D.Sc. (orientador)
Ricardo Alexandre Amar de Aguiar, D. Sc. (coorientador)

Rio de Janeiro
Março de 2015

ESTUDO DAS PROPRIEDADES MICROESTRUTURAIS DE LIGAS DE NÍQUEL-CROMO E COBALTO-CROMO OBTIDAS PELO PROCESSO DE METALIZAÇÃO A ARCO ELÉTRICO

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

Bruno Cavalcante Freitas

Aprovada por:

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

Prof. Ricardo Alexandre Amar de Aguiar, D.Sc. (coorientador)

Prof. Silvio Romero de Barros, D.Sc.

Prof. Leonardo Sales Araujo, D.Sc. - COPPE/UFRJ

Rio de Janeiro
Março de 2015

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

F866 Freitas, Bruno Cavalcante
Estudo das propriedades microestruturais de ligas de níquel-cromo e cobalto-cromo obtidas pelo processo de metalização a arco elétrico / Bruno Cavalcante Freitas.—2015.
x, 93f. : il.color. , grafs. , tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2015.
Bibliografia : f.88-93
Orientador : Hector Reynaldo Meneses Costa
Coorientador : Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

1. Revestimento em metal. 2. Aspersão térmica. 3. Revestimentos – Processo. 4. Ligas (Metalurgia). I. Costa, Hector Reynaldo Meneses (Orient.). II. Aguiar, Ricardo Alexandre Amar de (Coorient.). III. Título.

CDD 672.734

Dedico ao grande arquiteto do universo e a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu professor orientador Hector Reynaldo Meneses Costa, e co-orientador Ricardo Alexandre Amar de Aguiar pelo incentivo, orientação e dedicação, sem os quais seria impossível a realização deste projeto.

Agradeço ao Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, pela infraestrutura e pelo conhecimento fornecido na graduação, iniciação científica e no mestrado.

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

Aos graduandos, Júlia Bonaldo e Sarah de Andrade pela ajuda e apoio em boa parte dos trabalhos realizados.

À minha namorada, Lays, pela apoio, amizade, incentivo e compreensão que teve durante todo o meu período de aprendizado tanto na gradução como no mestrado.

"A maior recompensa para o trabalho de um homem não é o que ele ganha com isso, mas o que ele se torna com isso."

John Ruskin

RESUMO

ESTUDO DAS PROPRIEDADES MICROESTRUTURAIS DE LIGAS DE NÍQUEL-CROMO E COBALTO-CROMO OBTIDAS PELO PROCESSO DE METALIZAÇÃO A ARCO ELÉTRICO

Bruno Cavalcante Freitas

Orientadores:
Hector Reynaldo Meneses Costa
Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

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

Esse trabalho tem como objetivo avaliar as propriedades de revestimentos formados pela aspersão de ligas em substrato de aço carbono. O processo usado foi o de aspersão térmica por arco elétrico em revestimentos metálicos. Foi realizada uma avaliação microestrutural por microscopia ótica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) e também foram avaliadas as propriedades dos revestimentos por ensaio de microdureza e quantificação de porosidade. Os resultados obtidos por MO e MEV indicam que os revestimentos mostraram uniformidade na camada depositada e pequena quantidade de óxidos e porosidades. Em relação a porosidade, as condições estudadas apresentaram percentuais aceitáveis e similares aos encontrados na literatura.

Palavras-chave:
Aspersão térmica; Metalização; Revestimentos metálicos; Caracterização

Rio de Janeiro
Março de 2015

ABSTRACT

STUDY OF MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF NICKEL-CHROME AND COBALT-CHROME ALLOYS OBTAINED BY ELECTRIC ARC METALLIZATION PROCESS

Bruno Cavalcante Freitas

Advisors:
Hector Reynaldo Meneses Costa
Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

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.

This work has as main objective the evaluation of properties of coatings formed by the spray of alloys onto the surface of carbon steel substratum. The process used was thermal spray by electric arc of metallic coatings. An assessment of the microstructural morphology by optical microscope (OM) and scanning electron microscope (SEM) was made, and also evaluation of the coatings proprieties by microhardness measurement and porosity quantification. The results obtained by OM and SEM indicated that the coatings showed uniformity throughout the deposited layer and low amount of oxides and porosities. Regarding porosity, the studied conditions showed acceptable and similar percentage compared with studies found in literature.

Keywords:
Thermal spraying; Metalization; Metallic coatings; Characterization.

Rio de Janeiro
March, 2015

Sumário

I Introdução 1

II Revisão Bibliográfica 2

II.1. Fundamentos da Aspersão Térmica 2

II.2. Processos de Aspersão Térmica 7

II.2.1. Aspersão Térmica por Combustão 7

II.2.1.1. Chama Oxiacetilênica ou Convencional – Flame Spray 8

II.2.1.2. Detonação – D-Gun 12

II.2.1.3. Chama de alta velocidade – HVOF 14

II.2.2. Aspersão Térmica por Energia Elétrica 17

II.2.2.1. Arco elétrico – ASP 17

II.2.2.2. Plasma de Arco não Transferido – APS 20

II.2.2.3. Plasma de Arco Transferido – PTA 22

II.2.3. Aspersão Térmica a Laser 24

II.2.4. Comparativo entre os processos de Aspersão Térmica 25

II.3. Preparação do Substrato 27

II.3.1. Limpeza 27

II.3.1.1. Limpeza Mecânica 28

II.3.1.2. Limpeza Química 30

II.3.2. Texturização 31

II.3.3. Camada de Ligação 33

II.3.4. Pré-aquecimento 33

II.4. Características dos revestimentos depositados por Aspersão Térmica 34

II.4.1. Aderência 35

II.4.2. Porosidade 36

II.4.3. Oxidação das Partículas 39

II.4.4. Pós-tratamento dos Revestimentos 41

II.4.5. Microtrincas 42

III Metodologia Experimental 43

III.1. Método de Fabricação 43

III.2. Materiais 48

III.3. Caracterização dos revestimentos 53

III.3.1. Ensaio de microdureza Vickers 53

III.3.2. Microscopia Ótica 53

III.3.3. Avaliação de porosidade 54

III.3.4. Microscopia Eletrônica de Varredura 55

IV Resultados e Discussões 56

IV.1. Microscopia Ótica 56

IV.2. Análise de Porosidade 60

IV.3. Microdureza Vickers 65

IV.4. Microscopia Eletrônica de Varredura 75

V Conclusões 86

VI Sugestões para trabalhos futuros 87

Referências Bibliográficas 88

Capítulo I – Introdução

A Aspersão Térmica (AT) foi concebida no final do século XIX, pelo suíço Max Ulrich Schoop, que buscava um tipo especial de revestimento que não utilizasse imersão ou adesivo. Inicialmente, o processo utilizou jatos de vapor e ar comprimido. O ar acelerado a partir de um compressor, percorre o interior de uma serpentina tubular aquecimento-o e projetando as partículas de metal fundido na direção do material previamente preparado [1].

Atualmente, a aplicação da técnica de AT vem aumentando, devido à preocupação por parte das empresas, principalmente da área de óleo e gás, em ampliar a vida útil dos materiais expostos ao ambiente marinho severo. Além disso, a orientação que norteia a produção e os serviços de toda empresa, que é: “melhor, mais rápido e mais barato”, uma vez que a tendência da demanda de produção e serviços é sempre aumentar. Requisitos altamente exigentes e condições de serviços agressivas muitas vezes acarretam em possíveis acidentes, perda prematura de componentes e paradas de produção.

A Aspersão Térmica é um dos processos mais indicados para utilização em situações onde o objetivo é proteger superfícies metálicas de danos causados pela corrosão. Dentre todos os benefícios proporcionados pelo processo de aspersão térmica, se destacam: resistência ao desgaste superficial, condutividade ou isolamento elétrico e térmico e na obtenção de formatos desejados, provenientes do reparo de peças e componentes estruturais [1] [2]. A grande variedade de materiais desenvolvidos para serem utilizados por esse processo, nas mais diversas áreas de aplicação, a elevada vida útil desses depósitos aspergidos, a possibilidade de reparos imediatos em áreas danificadas e a utilização logo após sua aplicação, são benefícios que tem contribuído para o sucesso desse tipo de revestimento.

Para resistir a acréscimos nas solicitações térmicas e mecânicas é solicitado dos profissionais da área de ciência dos materiais o desenvolvimento de ligas específicas para resistir às mais diversas condições de serviço. Além do aperfeiçoamento dos processos, proporcionando que propriedades como porosidade e teor de óxidos sejam controladas durante o processo, acarretando na melhoria da qualidade do revestimento

Este trabalho tem como objetivo avaliar propriedades de diferentes materiais formados pela deposição de ligas de revestimentos pelo processo de aspersão térmica a arco elétrico em substrato de aço carbono SAE 1020, previamente preparado com jateamento abrasivo, para duas condições: sem selante e com selante. As propriedades que foram avaliadas são: dureza do revestimento pelo ensaio de microdureza Vickers, características microestruturais por

Microscopia Ótica (MO) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e quantificação de porosidade por uma ferramenta computacional de análise de imagens.

Os resultados encontrados neste estudo se encontram de acordo com as referências bibliográficas voltadas ao assunto. Em relação a dureza, foram encontrados valores superiores nas condições retificadas e o nível de porosidade menos nas amostras planas em comparação as amostras tubulares.

Capítulo II – Revisão Bibliográfica

Neste capítulo será abordado os principais processos de aspersão térmica, detalhando suas principais características.

II.1. Fundamentos da Aspersão Térmica

De um modo geral, a Aspersão Térmica (AT), também conhecida como spray térmico (***T****hermal* ***S****praying*, TS) ou metalização, é um processo por meio do qual se deposita sobre uma superfície previamente preparada camadas de materiais metálicos e não metálicos. Os metais de deposição são fundidos em uma fonte de calor gerada no bico de uma pistola apropriada, por meio da combustão de gases, arco elétrico, plasma ou laser. Por metalização faz-se revestimentos com zinco, alumínio, chumbo, estanho, cobre e diversas outras ligas [2].

Imediatamente após a fusão, o material aquecido é acelerado por gases sob pressão, confinados em um feixe, contra um substrato a ser revestido, atingindo-o no estado fundido ou semifundido [3]. Após o impacto, as partículas deformam-se formando lentes finas que aderem ao substrato, e em seguida, sobre a camada já existente, originam-se outras camadas de estrutura atípica, constituindo o revestimento. Essas camadas são constituídas de pequenas partículas em direção aproximadamente paralela ao substrato, com formato achatado, e microestrutura lamelar contendo inclusões de óxidos e vazios [4].

Cada processo de aspersão térmica possui suas particularidades, contendo assim benefícios e malefícios. Normalmente, observa-se que sua utilização tanto na fabricação, quanto na manutenção de materiais que necessitam de proteção contra desgaste superficial, corrosão, além de isolamento térmico e elétrico. O número de componentes e variáveis envolvidos no processo é grande e, quando adequadamente escolhidos em conjunto e devidamente aplicados, produzem um revestimento de melhor qualidade, e com melhores propriedades. A Figura II.1 ilustra detalhadamente o processo de confecção do revestimento e algumas de suas peculiaridades.

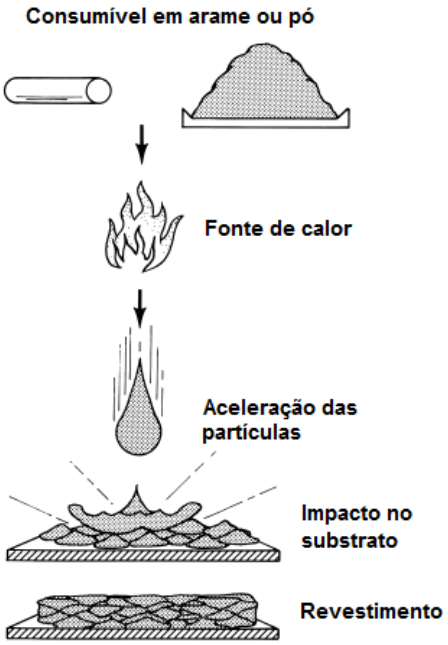


Figura II.1: Esquema da seção transversal da camada de revestimento obtido por aspersão térmica [4].

O material aspergido é ligado ao substrato por 3 tipos básicos de mecanismos, apresentados na Figura II.2 [5]:

1. Ligação mecânica:
    - O material é ligado ao substrato através da sobreposição ou pela existência em conjunto de saliências e reentrâncias. Também denominada de ligação por ancoramento.
2. Ligação por difusão:
    - O material é ligado ao substrato através de ligação metalúrgica, resultante da fusão localizada e difusão atômica com formação de soluções sólidas e partículas intermetálicas. Este processo pode ser agravado por meio de tratamentos térmicos, principalmente dispersão pós-pulverização. É considerado o efeito mais significante em termos de adesão
3. Ligação adesiva:
    - O material é ligado fisicamente a superfície depositada, consiste basicamente em forças de Van Der Waals. É considerado o efeito menos significante em termos de adesão

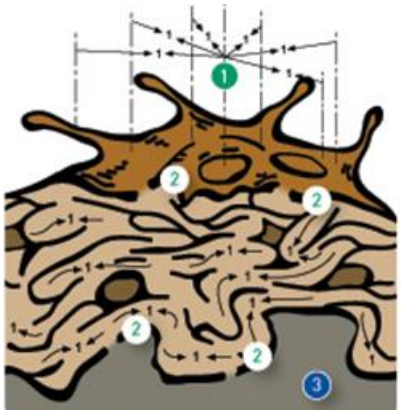


Figura II.2: Esquema da seção transversal da camada de revestimento, detalhando as características de interação entre três regiões diferentes do revestimento e do substrato [5].

A adesão adequada do revestimento ao substrato é influenciada por diversos fatores, que afetam diretamente a ligação e a subsequente acumulação do revestimento. Esses fatores são:

- Limpeza do substrato;
- Área de superfície do substrato;
- Perfil da superfície do substrato;
- Temperatura do substrato;
- Tempo - Taxas de reação, resfriamento, etc;
- Velocidade - Energia cinética;
- Propriedades físicas e químicas;
- Reações físicas e químicas.

O mercado norte-americano para revestimentos cerâmicos de alta performance avalia um faturamento anual estimado de US$ 1.420 bilhão em 2008. Este valor se manteve estável durante alguns anos, mas deverá aumentar para cerca de US$ 2 bilhões até 2014. Revestimentos de aspersão térmica dominam o mercado, com cerca de 67% das vendas totais de revestimentos em 2008, com previsões de aumento para 70% até 2014, conforme apresenta o indicador da Figura I.3.

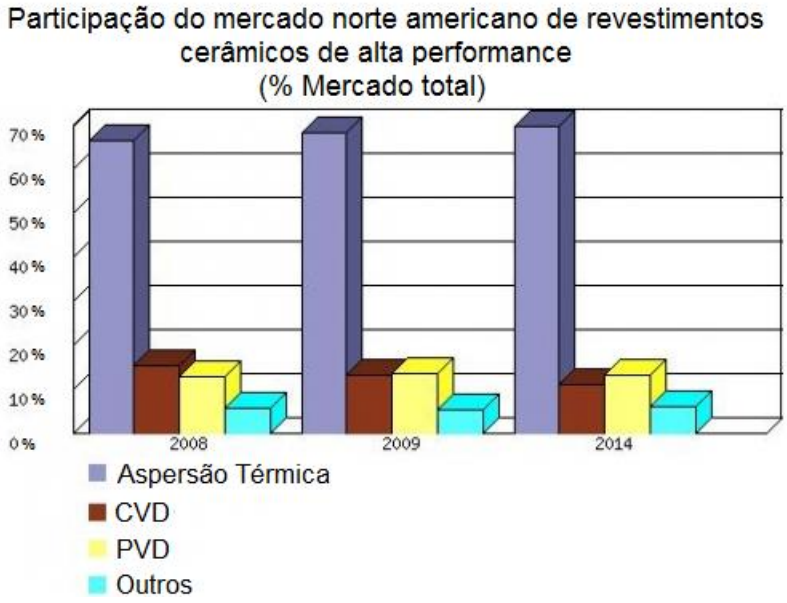


Figura II.3: Indicador da participação do mercado Norte Americano de revestimento de cerâmicos de alta performance [6].

Existem basicamente quatro tipos de consumíveis para o processo de metalização: pó, arame, vareta e cordão. Dentre os materiais que podem ser depositados pelo processo de aspersão térmica se encontram: metais, óxidos, compostos intermetálicos, plásticos orgânicos e alguns vidros. Já os substratos sobre os quais os revestimentos termicamente aspergidos podem ser aplicados incluem metais, óxidos, cerâmicos, vidros, a maioria dos plásticos e madeira, sendo que algumas técnicas especiais podem ser necessárias [7]. Contudo, não são todos os materiais que podem ser aplicados, sua escolha depende também do substrato.

A estrutura e a química do depósito aspergido são diferentes do material no seu estado original. Essas diferenças são devido à natureza progressiva do revestimento, a reação com os gases ou com a atmosfera e/ou com o material enquanto líquido durante o processo, podendo formar inclusões de óxidos e a combinação de endurecimento e têmpera que as partículas pulverizadas sofrem ao impacto formando assim metais aspergidos termicamente, em geral, mais duros que os metais que os originaram [7] [8].

As principais propriedades dos revestimentos por aspersão térmica são [4] [9]:

- Resistência mecânica: depende da aderência entre a camada e o substrato, bem como da coesão das partículas depositadas;
- Resistência ao desgaste: maior em geral nas camadas aspergidas quando comparadas ao mesmo material sob a forma fundida ou forjada;

- Resistência à corrosão: estudos vêm sendo realizados na utilização de camadas aspergidas, com ligas específicas, para conferir maior resistência ao substrato quando empregados em meios corrosivos;
- Resistência a fadiga superficial: é dependente do comportamento de fratura do substrato, dureza, características microestruturais e distribuição das tensões residuais na superfície do revestimento. Estudos realizados por Souza, *et al.* [10] verificaram melhorias na resistência à fadiga em amostras com revestimento a aspersão térmica de carbeto de tungstênico, em comparação ao processo de eletrodeposição de cromo duro;
- Microestrutura: constituída por lamelas, com inclusões de partículas resolidificadas, microtrincas, vazios, óxidos e defeitos;
- Porosidade: função dos parâmetros de cada processo de aspersão térmica, temperatura da chama ou arco elétrico, gás de transporte, velocidade das partículas e qualidade do substrato a ser revestido;
- Espessura da camada de revestimento: controlada pelo tamanho do pó considerando constante a velocidade de avanço da pistola, fluxo de material, e número de camadas depositadas.

II.2. Processos de Aspersão Térmica

O desenvolvimento de novas tecnologias, principalmente pela demanda de métodos mais eficazes e eficientes de produção de revestimentos, e com o auxílio da engenharia de superfícies, colaboraram com a criação de diversas variações de processos de deposição de revestimentos aspergidos termicamente.

O fluxograma apresentado na Figura II.4 lista os processos de aspersão térmica a partir dos tipos de fontes de energia. Entretanto, os processos também podem variar em termos de: consumível a ser depositado, método de aquecimento, método de aceleração das partículas em direção ao substrato e outros. A seguir, algumas técnicas dos processos são detalhadas, fornecendo suas principais características e respectivas vantagens e desvantagens.

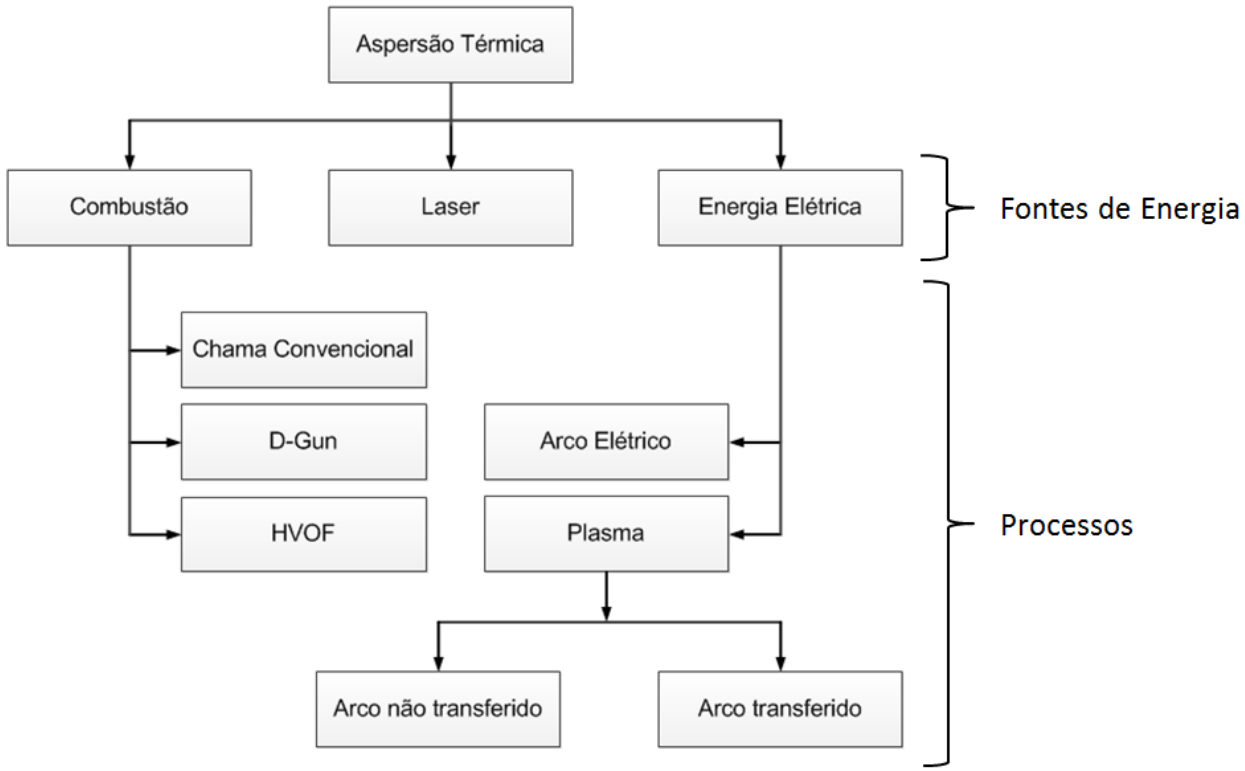


Figura II.4: Fluxograma das fontes de energia e dos processos utilizados em aspersão térmica.
Fonte: O próprio autor.

II.2.1. Aspersão Térmica por Combustão

É a variação do processo de metalização que utiliza queima de gases combustíveis para fundir ou aquecer o material de adição. Dentre os possíveis materiais que podem ser utilizados nesse processo se encontram os metais e ligas metálicas que não fundem e não sublimam a temperaturas inferiores a 2.760 °C [8] [9].

Tabela II.1: Características dos processos de aspersão por combustão [11].

Parâmetros	Informações
Material	Pó (Metais e Cerâmicos) Ligas de Metais e Polímeros
Temperatura de chama	Max. 3.100 °C
Velocidade das partículas	Acima de 50 m/s
Deposição do processo	35 a 150 g/min

A atomização e aceleração em direção ao substrato são realizadas com ar comprimido, podendo em casos especiais ser utilizado gás inerte. O gás utilizado neste processo pode ser uma combinação de oxigênio com um dos seguintes gases: propileno, acetileno, propano, gás natural, hidrogênio, mistura estabilizada de metilacetileno com propadieno, e outros [12]. A pulverização por combustão pode ser realizada utilizando quatro tipos de consumíveis: arame, cordão, vareta (sólido ou tubular); e pó.

Existem três tipos de aspersão térmica por combustão, que serão apresentados e minuciosamente comentados a seguir.

II.2.1.1. Chama Oxiacetilênica ou Convencional – *Flame Spray*

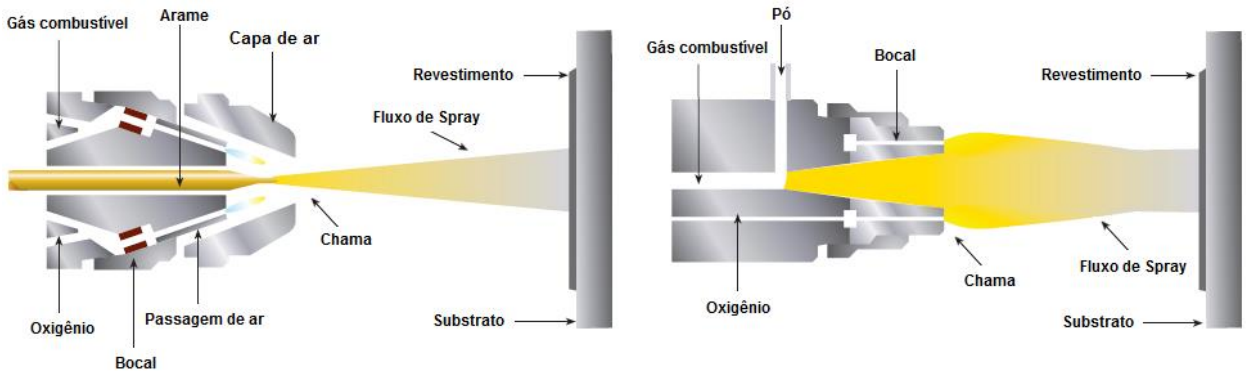
A Chama Convencional ou Oxiacetilênica foi o primeiro processo de aspersão térmica formalmente desenvolvido pelo inventor Max Ulrich Schoop [1], e até hoje possui grande aplicabilidade industrial, devido a vários fatores como: elevada temperatura de chama, facilidade de manuseio e baixo custo de equipamento e manutenção.

No processo de aspersão térmica à chama convencional ou oxiacetilênica é utilizada uma chama oxi-combustível, onde o calor fornecido pela mistura dos gases proporciona a fundição do material de deposição [13]. Das possíveis fontes de calor, o acetileno é o gás combustível mais utilizado pelo processo de aspersão à chama devido à alta temperatura da chama oxigênio-acetileno, vide Tabela II.2 [11].

Tabela II.2: Temperatura de fontes de calor [11].

Fonte	Temperatura (°C)
Propano + Oxigênio (C_3H_8+ O_2)	2.526
Hidrogênio + Oxigênio (H_2+ O_2)	2.660
Propileno + Oxigênio (C_3H_6 + O_2)	2.843
Acetileno + Oxigênio (C_2H_2 + O_2)	3.087
Gás natural + Oxigênio (Gás natural + O_2)	2.538
Arco Plasma	2.200 a 2.800

Em termos de tipo físico de material de deposição, o processo de aspersão térmica convencional é dividido em consumíveis de quatro formas distintas: consumíveis em forma de pó, cordão, arame, ou vareta (sólido ou tubular). A Figura II.5 apresenta os processos de aspersão térmica utilizando consumíveis de arame e pó.



(a) (b)

Figura II.5: (a) Ilustração do processo de aspersão térmica à chama alimentado por arame (b) Ilustração do processo de aspersão térmica à chama alimentado por pó [13].

No método de aspersão térmica utilizando o material de deposição em forma de pó, o consumível é normalmente introduzido na pistola em um recipiente que pode ser parte integrante da tocha ou ser acoplado a ela. Normalmente, o material de deposição é introduzido apenas com auxilio da gravidade, entrando assim em contato com chama, que é responsável pela fundição e juntamente com auxílio do ar comprimido, projeta partículas fundidas e aquecidas em direção ao substrato.

As velocidades das partículas são, portanto, muito baixas, de modo que os revestimentos obtidos são normalmente de qualidade inferior aos obtidos por outros processos em termos de porosidade e aderência da camada [11]. Velocidades de transferência são proporcionais a qualidade final do revestimento. Algumas mudanças nos projetos dos

equipamentos de aspersão térmica que auxiliam no desempenho de deposição e adesão do revestimento, estão listadas a seguir:

- Gás comprimido para alimentação do pó na chama;
- Jatos adicionais de ar comprimido;
- Alimentador de pó remoto com arraste de pó para a tocha por tubo pressurizado com gás inerte;
- Instalação de dispositivos para aceleração a alta velocidade à pressão atmosférica;
- Adição de materiais autofluxantes.

Os materiais autofluxantes são materiais que contêm elementos que reagem com o oxigênio ou óxidos para formar óxidos de baixa densidade que flutuam para a superfície. São assim nomeadas devido a formação de compostos duros formados pela presença de boro, fósforo e silício presentes nessas ligas, melhorando a aderência das camadas do revestimento. Em geral são ligas à base de níquel ou cobalto, as quais têm adições de boro, fósforo ou silício, individualmente ou combinados, servindo como agentes fluxantes e redutores do ponto de fusão [14]. Estes materiais têm ponto de fusão relativamente baixo e necessitam de tratamento térmico pós-aspersão.

No método de aspersão térmica utilizando o material de deposição em forma de arames, o bocal da chama é alimentado coaxialmente com o consumível, por intermédio de roletes alimentadores, presentes na região posterior à tocha. A chama possui a função de fundir o material consumível, contudo, também auxilia na pulverização, junto ao ar comprimido, ou um gás inerte em certas aplicações. Em casos especiais pode ser utilizado gás inerte para redução da oxidação, já que esta prejudica a aderência do revestimento. Segundo Saremi e Valefi [15], microestruturas de revestimentos de amostras de aço inoxidável AISI 420 revestidas pelo processo de aspersão térmica à chama oxiacetilênica, apresentaram revestimentos mais densos e sem defeitos, utilizando H_2 como gás de atomização em detrimento ao uso de O_2.

A utilização de pós tem grande vantagem em relação à aspersão usando arames, devido ao fato de disponibilizar uma quantidade muito superior de ligas para aspergir contra o substrato (plásticos, cerâmicos e ligas metálicas). Especificamente para a aplicação de materiais cerâmicos, o uso de barras sólidas, ao invés de pó ou arame, é prática comum. A fragilidade intrínseca dos materiais cerâmicos não permite o enrolamento de arame em carretéis [16].

A energia cinética deste processo, ou seja, a velocidade das partículas é basicamente controlada pela pressão e pela velocidade do gás de propulsão [17]. Outras características do processo da aspersão térmica à chama convencional são listadas abaixo [18]:

- Diâmetro do arame: 3 a 6 mm;
- Tamanho das partículas de pó: 5 a 100 µm;
- Taxa de alimentação: 4,8 a 39 kg/h (arame) e 3 a 6 kg/h (pó);
- Razão oxigênio/combustível: 1:1 (atmosfera redutora), 1,1:1 (atmosfera oxidante);
- Temperatura alcançada pela chama: 2.700 a 3.100 °C;
- Pressão e vazão de oxigênio e combustível dependem o tipo da pistola;
- Meio gasoso de transporte das partículas fundidas: N_2, O_2, CO, CO_2, etc;
- Aderência da camada: 4 a 20 MPa (Al, Zn e cerâmicos), 60 MPa para ligas NiAl;
- Porosidade: 10 a 20 %;
- Espessuras depositadas: 100 a 2.500 µm;
- Distância para aspersão: 120 a 250 mm (consumível pó) e 102 a 254 mm (consumível arame);
- Ângulo da pistola: melhores resultados a 90°;
- Materiais normalmente aspergidos com o uso de arames: alumínio, zinco, aços resistentes ao desgaste, aços inoxidáveis da série 300, bronze e molibdênio.

Podem-se relacionar algumas vantagens e desvantagens do processo de chama convencional [18]:

VANTAGEM:

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

DESVANTAGENS:

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

II.2.1.2. Detonação – D-Gun

O método de aspersão térmica por “detonação” foi concebido em 1948 e patenteado em 1955, pela Union Carbide, atual Praxair Surface Technologies. Esse processo continua sendo o processo de revestimento à aspersão térmica mais utilizado, em termos de provimento de resistência ao desgaste e aumento de propriedades mecânicas [4].

O processo consiste da utilização de uma câmara de reação com comprimento de 450 à 1.350 mm, e diâmetro interno de 21 à 25 mm com resfriamento a água. Atua com uma mistura de oxigênio e acetileno (ou propano-butano) e uma carga de pó. É um processo intermitente que repetidamente aquece e projeta cargas de pó contra o substrato através de sucessivas detonações. Após a ignição dos gases, as ondas de detonação aceleram o pó a velocidades da ordem de 750 à 900 m/s. Pode operar de 1 à 15 detonações por segundo, com purgas de nitrogênio após cada ejeção de pó e antes das sucessivas detonações. A temperatura máxima alcançada pela mistura detonada chega a 4.227 °C com 45% de acetileno. O ciclo de purga, injeção e detonação é repetido numa freqüência de 3 a 6 Hz [4].

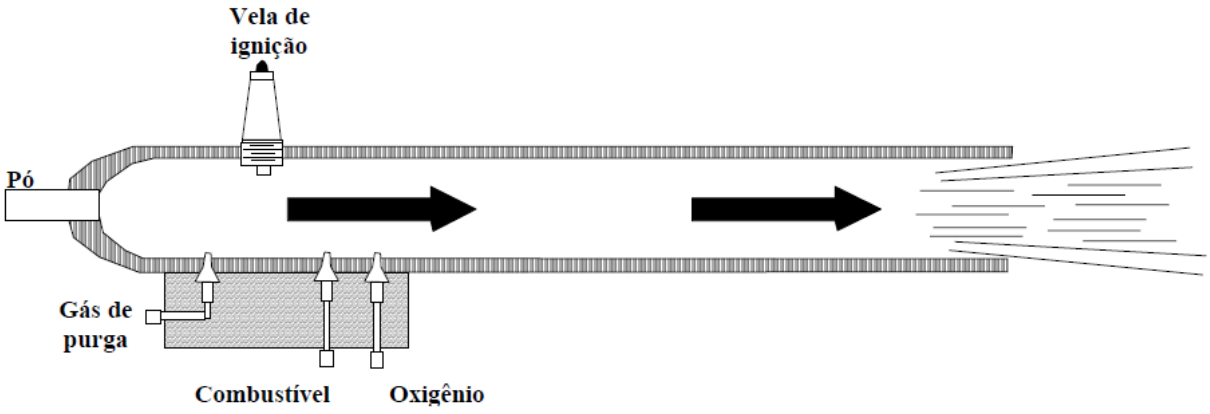


Figura II.6: Esquema do dispositivo de aspersão do tipo D-Gun [19].

A tocha de detonação, mostrada na Figura II.6, consiste basicamente de um tubo comprido, no qual é introduzida uma mistura de gás combustível, oxigênio e pó. Quando é feita a ignição da mistura, uma onda de choque controlada aquece e acelera as partículas de pó, cuja velocidade de saída é de 760 m/s aproximadamente (mais que o dobro da velocidade do som no ar). Após cada injeção de mistura, certa quantidade de nitrogênio é introduzida no tubo

para a purga deste. É um processo intermitente que repetidamente aquece e projeta cargas de pó contra o substrato através de várias detonações por segundo (cerca de 1 a 15 detonações), permitindo a deposição das camadas até a espessura desejada enquanto a peça é girada ou passada em frente da pistola [18].

A tocha de detonação utiliza a energia de explosões de uma mistura oxigênio-acetileno (ou propano) e uma carga de pó, aquecendo e impulsionando o pó até a superfície do substrato e é devido a essa mistura que o processo é caracterizado como a chama. O depósito resultante é extremamente duro, denso, fortemente ligado ao substrato (boa aderência).

Ocorrem várias detonações por segundo, gerando um ruído da ordem de 150 dB, sendo necessário instalações especiais, com isolamento acústico para estas operações. Esse fator acarreta na necessidade do sistema ser totalmente mecanizado e/ou robotizado. Dentro do tubo, temperaturas superiores a 3.300 °C são atingidas, enquanto a temperatura do substrato deve ser mantida abaixo de 150 °C, utilizando dispositivos de resfriamento, caso seja necessário. Alguns autores acreditam que as partículas aspergidas pelo processo D-Gun não necessitam estar fundidas [14] [18]. As ondas de choque e a conversão de energia cinética em calor durante o impacto, determinam revestimentos de grande aderência e baixíssima porosidade, admitindo-se que minúsculos pontos de solda são formados entre as partículas e o substrato e entre as partículas previamente depositadas. Algumas características deste processo são citadas a seguir [18]:

- Porosidade: 0,5 a 2%;
- Distância de aspersão: 100 mm;
- Diâmetro do ponto aspergido: 25 mm;
- Taxa de alimentação de pó: 0,96 a 2,4 kg/h;
- Espessuras típicas depositadas: 300 µm;
- Aderência da camada: > 83 MPa (WC-Co); > 70 MPa (Al_2O_3);
- Granulometria de pó necessária: 5 a 60 µm;
- Espessura por ciclo de ponto aspergido: 3 a 10 µm;
- Ângulo de aspersão: pode alcançar valores inferiores ao processo a plasma.

Podem-se relacionar algumas vantagens e desvantagens do processo de chama convencional [14] [18]:

VANTAGEM:

- Baixa densidade de óxidos;
- Baixa densidade de poros;
- Praticamente todo o material metálico, cerâmico ou cermets pode ser depositado por este processo;
- Revestimento denso, duro e com elevada resistência adesiva.

DESVANTAGENS:

- Elevado ruído;
- Baixa taxa de alimentação;
- Operação completamente automatizada e controlada remotamente, aumentando o custo inicial deste processo;
- Elevado custo de manutenção, devido ao elevado custo dos materiais.

II.2.1.3. Chama de alta velocidade – HVOF

Este é um dos processos mais promissores e relativamente recentes na família da aspersão térmica [13], foi desenvolvido comercialmente por volta da década de 1980 pelo engenheiro James Browning. Seu propósito foi criar um processo de aspersão térmica com elevada velocidade de pulverização, alcançando cerca de 1.200 m/s, podendo chegar a 5.000 m/s em pistolas mais modernas [7] [8]. Esse processo é bem similar à aspersão térmica por chama convencional, a grande diferença é o uso de jatos supersônicos, resultando em revestimentos com menor densidade de porosidades [20].

O processo de aspersão térmica HVOF consiste na queima do combustível, por intermédio de um dispositivo de ignição externo ou chama piloto, junto ao oxigênio a alta pressão dentro de uma câmara de combustão, gerando um jato de exaustão de alta velocidade. Os gases de combustão fluem através de um bocal para fora da pistola a velocidades supersônicas [14]. O pó é introduzido no bocal axialmente, e é aquecido e acelerado para fora do bocal, além de possuir um sistema de resfriamento à água que troca calor com a câmara de combustão e o bocal.

A característica mais relevante deste sistema é a presença de *diamond shocks* na chama, os quais são resultantes de ondas estacionárias representando nós de velocidade. Não

há correlação direta entre o número de diamantes e a velocidade do som. Entretanto, caracterizam correntes de gases muito velozes. Quanto maior a quantidade de nós, maior a velocidade do gás. Tanto a distância quanto o ângulo entre os nós estão também relacionados à velocidade do jato de gás [16].

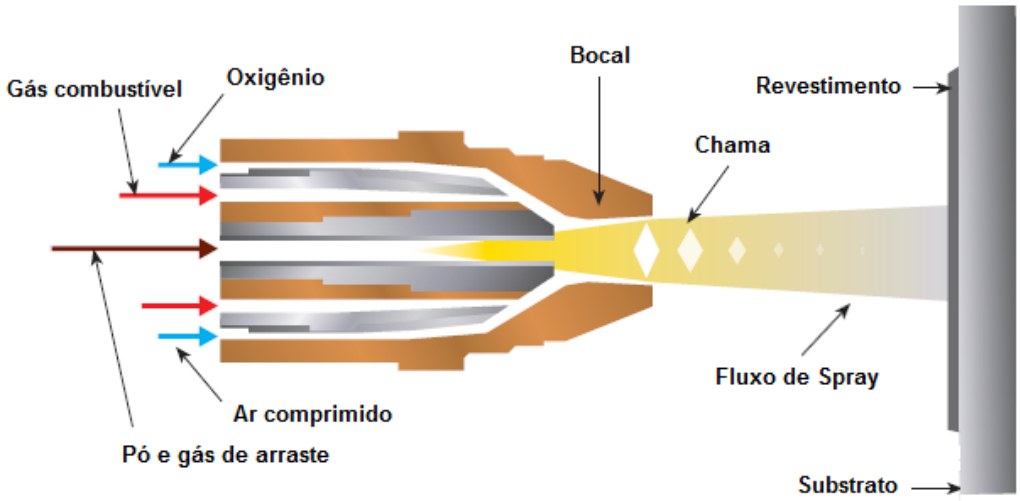


Figura II.7: Ilustração do processo de aspersão térmica HVOF [12].

Uma das limitações dos processos à combustão é o poder calorífico dos gases combustíveis, devido a isto, os avanços tecnológicos tiveram como meta aumentar a velocidade das partículas. As partículas tendem a chegar ao substrato com elevada energia térmica (fonte de calor) e cinética (alta velocidade), aumentando a resistência adesiva do revestimento com o substrato, devido a deformação superficial do substrato causado pelo impacto das partículas propelidas [21].

Gases combustíveis (hidrogênio, propano ou propileno) e oxigênio são utilizados para gerar um jato de combustão a temperaturas de 2.500 à 3.100 °C. A combustão ocorre internamente a câmara a elevados valores de pressão interna, saindo através do pequeno diâmetro (tipicamente de 8 a 9 mm) do tambor para gerar um jato de gás supersônico ou hipersônico, com elevadas velocidades de partículas. O processo resulta em revestimentos com baixa densidade de porosidade e com elevada resistência a adesão, tornando-o atraente para muitas aplicações. Tanto pó como arame podem ser utilizados como matéria-prima a ser pulverizado, com taxas de aspersão de 2,3 a 14 kg/h [22].

Normalmente, utiliza-se pó como consumível, e como combustível utiliza-se acetileno, metilacetileno-propadieno (MAP), hidrogênio, propileno, propano e querosene. A chama pode atingir temperaturas na faixa de 2.900 a 3.170 °C, dependendo das características da mistura. Para exemplificação, a mistura oxigênio-acetileno (1,5:1 em volume) alcança a temperatura de 3.170 °C, enquanto a combinação oxigênio-propileno (4:1 em volume) pode alcançar 2.900 °C.

Estudos recentes questionam a necessidade das partículas pulverizadas estejam no estado líquido durante o impacto no substrato. Em virtude da elevadíssima velocidade das partículas, considera-se que o encontro da partícula contra o substrato, ou contra as partículas já depositadas, possa levar a uma fusão superficial devido a elevada energia cinética, que após a colisão é convertida em energia térmica [8] [14].

Os processos de aspersão HVOF, apesar de terem sido desenvolvidos como uma alternativa ao processo de aspersão D-Gun (Detonação), atualmente emergem como competidores ao processo de aspersão a plasma, possuindo a vantagem do custo inicial de instalação ser bastante inferior a estes dois processos. Além da maior qualidade do revestimento e nível inferior de tensões residuais, as técnicas HVOF possuem eficiência de deposição superior, menores sensibilidades a mudanças no ângulo de aspersão e menos variáveis críticas no processo. Outras características são listadas abaixo [18]:

- Porosidade: menor que 1%;
- Aderência da camada: acima de 90 MPa;
- Distância de aspersão: 150 à 300 mm;
- Taxa de alimentação de pó: 1,2 à 4,8 kg/h;
- Pressões típicas do gás combustível: 3 à 7 atm;
- Espessuras típicas depositadas: 100 à 300 µm.

Podem-se relacionar algumas vantagens e desvantagens do processo HVOF [14] [18]:

VANTAGEM:

- Elevada resistência adesiva;
- Baixa densidade de poros e óxidos;
- Baixo custo inicial de equipamentos e instalação;
- Excelente resistência ao desgaste e à corrosão;
- Os revestimentos podem ser usinados com dimensões finais e acabamento.

DESVANTAGENS:

- Elevado nível de ruídos, cerca de 140 dB;
- Qualificação de funcionários para operar equipamentos;
- Necessita de maiores cuidados e dispositivos, principalmente de segurança.

II.2.2. Aspersão Térmica por Energia Elétrica

II.2.2.1. Arco Elétrico – ASP

A aspersão térmica a arco elétrico foi originalmente concebida por M. U. Schoop em aproximadamente 1910, entretanto, apenas começou a ser comercializado na década de 1960 [1]. Esse processo utiliza o arco elétrico como fonte de calor para fundir o arame de deposição. Ao contrário dos outros processos de aspersão térmica, onde o aquecimento das partículas é proporcionado por jatos de gás aquecido, esse processo utiliza corrente contínua, obtida a partir da diferença de potencial adquirida entre dois fios de eletrodos consumíveis, continuamente alimentados em consonância. Um fator limitante para esta técnica é o fato de os materiais aplicados terem de ser eletricamente condutores [14].

Um jato de gás atomizante em elevada velocidade, formado anteriormente a interseção dos arames (geralmente utiliza-se ar comprimido) é direcionado ao arco elétrico na região onde o material é fundido, atomizando-o em forma de gotículas fundidas e projetando-o contra o substrato. Sugere-se o uso de gases inertes em alta velocidade, como argônio, hélio e até nitrogênio, para evitar oxidação excessiva dos revestimentos.

O acionamento do mecanismo de alimentação contínua do arame pode ser feito por meio de pequena turbina, movida a ar comprimido ou por motor elétrico. A velocidade de projeção de partículas atinge até 250 m/s [18]. Na unidade de controle são ajustados a alimentação dos arames, o suprimento de ar comprimido e a energia elétrica. A Figura II.8 ilustra os componentes de um equipamento de AT à arco elétrico, principalmente a pistola de aspersão, onde o ar comprimido atua como gás atomizante.

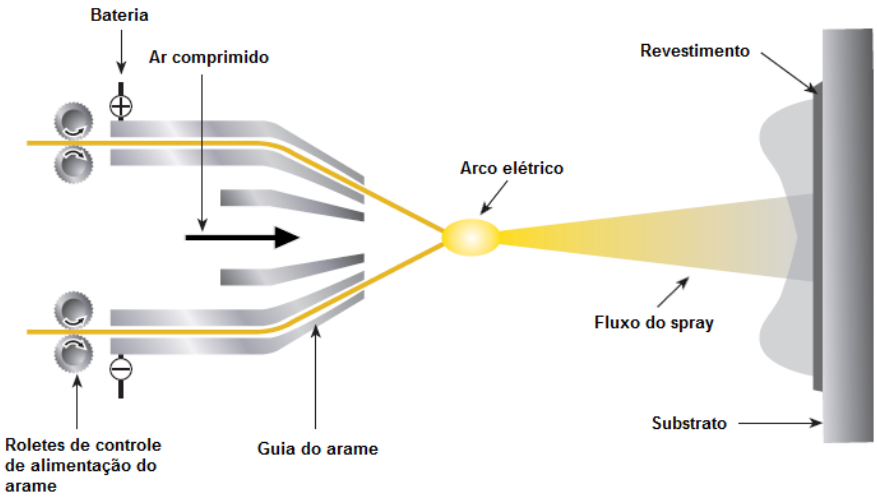


Figura II.8: Esquema do processo de AT à arco elétrico [13].

Dentre os componentes básicos para a realização da operação, listam-se: alimentadores de arame à velocidade constante, fonte de corrente contínua do tipo tensão constante, tocha de aspersão e um sistema de fornecimento de gás comprimido controlável além de mangueiras e cabos. Os arames utilizados são, em geral, de grande diâmetro, da ordem de 5 mm [19].

Até o ponto de encontro dos arames, estes se mantem isolados um do outro. O arco é obtido por diferença de potencial, na faixa de 18 a 40V, fundindo as pontas dos arames eletrodos [11]. Esse processo permite operação com vários materiais, tanto materiais puros como ligados (sólidos e tubulares). A voltagem deve ser mantida nos níveis mais baixos para manter a estabilidade do arco, o que deveria resultar em camadas mais densas e uniformes.

A temperatura do arco é significantemente maior que o ponto de fusão do material de deposição, podendo variar de 4.000 à 6.000 °C [11]. Em alguns casos, podemos ter o superaquecimento e volatilização, particularmente na aplicação de zinco e alumínio. A alta temperatura das partículas pode produzir zonas de interação metalúrgica (reação química) ou zonas de difusão ou ambas, após o impacto com o substrato. Essas características proporcionam melhores condições de adesão ao substrato.

Esse é um processo de média/alta energia, que produz uma camada depositada com índices de óxidos inferiores ao processo de aspersão a chama. Elevando-se a diferença de potencial entre os arames aumenta-se o comprimento do arco e o tamanho das gotículas, com a compactação elevada das partículas, obtém-se um menor índice de porosidades na camada (camada mais densa). Porém, para obtenção de revestimentos densos e de melhor acabamento, a diferença de potência deve ser mantida em valores mínimos compatíveis com a estabilidade do arco [7].

A aderência do revestimento, neste processo, é alta, sendo de 3 a 4 vezes superior à aderência dos processos à chama, considerando a deposição da mesma liga sobre o mesmo substrato. As taxas de deposição são também mais altas, comparando com outros processos, devido à corrente, a velocidade do arame e principalmente a utilização de dois arames enquanto que na técnica à chama convencional utiliza somente um, tornando assim bastante econômico a aplicação de revestimento em grandes superfícies.

Valores na faixa de 13,5 kg/h referente à taxa de deposição para o processo de arco elétrico comparados com 1,8 à 9 kg/h para a combustão com pó e 5,4 kg/h para a combustão com arame são encontrados na literatura [17]. Fabricantes relatam taxas de deposição de até 52,9 kg/h para a aspersão de zinco utilizando pistolas a arco elétrico [17]. A Tabela II.3 abaixo correlaciona consumíveis com suas respectivas taxas de deposição. Sugere-se ainda, caso

seja necessário produzir camadas depositadas mais compactas e densas, adicionar dispositivos adicionais, que elevam a velocidade de atomização das partículas diminuindo assim o índice de porosidade.

Tabela II.3: Taxas de pulverização de arco elétrico para vários [4].

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

Os únicos fatores que controlam a taxa de deposição são a corrente elétrica e a taxa de alimentação do arame necessária para esta corrente. A ausência de gases de combustão leva a uma redução do aquecimento do substrato, o que é desejável para alguns componentes, dependendo de sua aplicação [22] [23]. Os fabricantes de pistola a arco normalmente fornecem valores maiores de aderência e coesão e menor porosidade em relação à técnica à chama com arame ou pó, por possuírem velocidades de partículas mais altas. Outras características são listadas abaixo [18]:

- Potência elétrica: 5 a 10 kW;
- Temperatura do arco: 5.800 °C a 280 A de corrente;
- Voltagem: 18 a 40 V;
- Distância de aspersão: 50 a 170 mm;
- Pressão do gás de atomização: 0,2 a 0,7 Mpa;
- Vazão de gás atomizado: 1 a 80 m³/h;
- Aderência da camada: 10 a 30 MPa (Zn e Al), 70 MPa (ligas NiAl);
- Porosidade: 2 a 10%;
- Espessuras típicas depositadas: 100 a 1.500 µm;
- Ângulo de aspersão: melhores resultados a 90º;
- Taxa de deposição: 3 a 18 kg/h;
- Diâmetros típicos dos arames: 2 a 5 mm.

Apesar dos fundamentos dos processos continuarem os mesmos, seu desenvolvimento tem evoluido em termos de: alimentação contínua de arame, utilizando motor elétrico e não apenas ar comprimido, aumento da taxa de propagação da chama, introdução de bocal tipo fechado e capa de ar secundária, gases de combustão, entre outros. Especificamente no caso do uso de gases de combustão, a introdução de uma pequena câmara de combustão interna à pistola e anterior ao arco elétrico gera gases de combustão. Misturas de ar comprimido e propano, por exemplo, com temperatura e pressão elevadas o suficiente para gerar partículas de menor diâmetro e eventualmente de maior velocidade. Consequentemente, níveis de porosidade acima de 1% e rugosidade superficial inferiores ao arco elétrico convencional são obtidos [18].

Podemos relacionar algumas vantagens do processo de aspersão térmica a arco elétrico, destacando-se [18]:

VANTAGEM:

- Tocha leve e compacta;
- Ampla gama de ligas para o revestimento;
- Ligação metalúrgia entre o substrato e o depósito;
- Elevado desempenho na aderência do revestimento;
- Elevadas taxas de deposição, chegando à até 36 kg/h;
- Alimentação constante do arame, aumentando a produtividade.

DESVANTAGENS:

- Material do revestimento deve ser eletricamente condutivo;
- Necessário o uso de gás inerte para transporte das partículas, em aplicações especiais, reduzindo a oxidação do revestimento;
- Relativamente alta concentração de porosidade, comparado aos outros processos de aspersão;
- Oxidação das partículas quando transportadas pelo ar comprimido.

II.2.2.2. Plasma de arco não transferido – APS

O processo de aspersão térmica por plasma (APS ou *air plamas spraying*) utiliza o calor de um arco plasma para provocar a fusão do material de revestimento que é aplicado, na forma de pó. O termo "arco de plasma" é usado no propósito de descrever um escopo de processos de trabalho em metais que utilizam um arco elétrico constringido para fornecer energia térmica de alta densidade [14]. Na aspersão por plasma, um arco elétrico “não transferido” é

constringido entre um eletrodo de tungstênio coaxialmente alinhado e um bocal de constrição. Após atravessar o arco elétrico, o gás inerte (argônio, nitrogênio, hidrôgenio, hélio ou mistura), é aquecido e ionizado gerando o plasma, conforme esquema mostrado na Figura II.9.

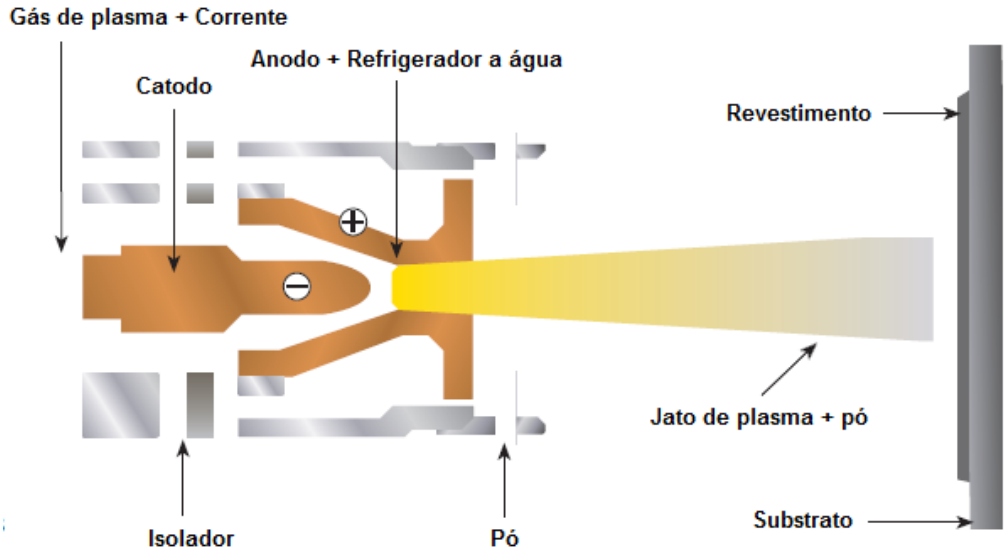


Figura II.9: Esquema de AT por plasma não transferido [13].

A velocidade das partículas atinge entre 80 a 300 m/s e a temperatura típica do gás de plasma varia de 5.000 à 25.000 °C, dependendo das misturas dos gases. Outras variáveis importantes do processo, que afetam a fusão são: tipo de bocal constritor, taxa de alimentação do pó, ângulo de injeção, vazão do gás e as configurações de energia (amperagem e voltagem). Adicionalmente, um gás secundário pode ser injetado aumentando o calor e mantendo a tensão constante. A taxa de solidificação normal após o impacto com o substrato é rápida, cerca de 10 K/s [24] [27].

Uma ótima característica do processo é a sua versatilidade em mudanças de temperatura do plasma, velocidade das partículas e nas condições de operação. Esta versatilidade permite uma ampla seleção de materiais de pulverização e a distribuição do tamanho das partículas. Além disso, as altas temperaturas associadas com o plasma permitem a deposição em materiais cerâmicos, de alto ponto de fusão, tais como zircônio estabilizado com ítrio para aplicações de barreira térmica [8]. Nesta técnica menos energia é necessária, quando comparado ao processo de aspersão de arco não transferido.

Outras características do processo são listadas abaixo [18]:

- Porosidade: Entre 1 à 7%;
- Taxa de alimentação de pó: 3 à 6,6 kg/h;
- Dimensão das partículas do pó: 5 à 100 μm;
- Distância de aspersão: 60 à 130 mm;

- Espessuras depositadas: 50 à 500 μm;
- Nível de ruído na faixa de 140 dB;
- Ângulo de aspersão: usualmente 90°.

Podemos relacionar algumas vantagens do processo de aspersão térmica à arco elétrico, destacando-se [18]:

VANTAGEM:

- Alta densidade dos revestimentos;
- Altas taxas de deposição;
- Altas espessuras por passe.

DESVANTAGENS:

- Dificuldade de manipualção da cabeça da tocha;
- Elevado custo de operação;
- Instalação em ambiente de proteção acústica.

II.2.2.3. Plasma de arco transferido – PTA

O processo de arco de plasma transferido (PTA) fornece ao processo de aspersão a plasma a capacidade de aquecimento e fusão superficial do substrato. Essa característica é uma combinação de soldagem e aspersão térmica. Neste processo, um arco é estabelecido entre o elétrodo não consumível do maçarico de plasma e a própria peça de trabalho. A matéria-prima, sob a forma de arame ou de pó, é introduzida no plasma externamente. O material é fundido e aspergido sobre o substrato, produzindo uma ligação metalúrgica semelhante ao processo de soldagem. A Figura II.10 apresenta um esquema de AT por plasma transferido.

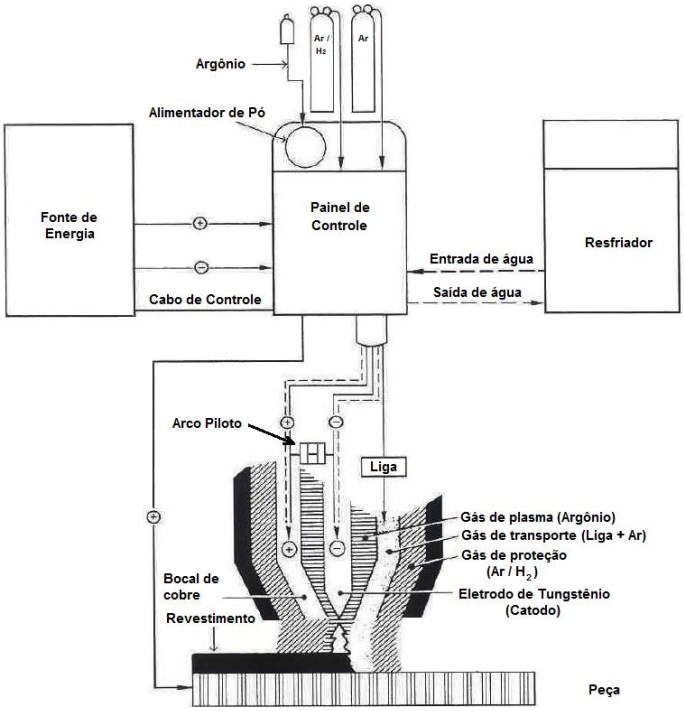


Figura II.10: Esquema de AT por plasma transferido [25].

O PTA é um processo de alta energia, que utiliza gás inerte no processo de deposição. Normalmente utiliza argônio como gás de abastecimento de plasma, de transporte e barreira de proteção ao material depositado. Além disso, é um processo que realiza deposição de qualidade de diversas ligas, principalmente para proteção ao desgaste, corrosão e choque térmico. Algumas ligas são feitas para reparo dimensional, enquanto outras são projetadas para ser uma sobreposição final para proteção da superfície do material.

Neste processo menos energia é necessária em comparação ao processo de AT por plasma de arco não-transferido. Para aplicação de carbonetos, por exemplo, a aspersão por plasma de arco transferido usa em torno de 5% da energia necessária no processo de arco não-transferido, para o mesmo volume de deposição [14].

Estudos realizados por Deshpande *et al*. [27] compararam para o mesmo substrato, nas mesmas condições de preparação, quantitativamente a porcentagem de óxidos e porosidades nos revestimentos após a aspersão térmica por HVOF, ASP e APS. Ligas de níquel e alumínio foram aspergidas por estes métodos. Como resultado, o processo de HVOF resultou em 3,1% de porosidade e óxidos, e os processos de ASP e APS resultaram em 16,5% e 20,5 % de porosidade e óxidos respectivamente.

Outras características do processo são listadas abaixo [14]:

- Baixa diluição do substrato: 10%;
- Expessuras depositadas: 0,5 à 6 mm;

- Larguras de 32 mm/passe;
- Taxa de alimentação de pó: 9 kg/h.

Pode-se relacionar algumas vantagens do processo de aspersão térmica à arco elétrico, destacando-se [18]:

VANTAGEM:

- Ausência de escória;
- Alta densidade de revestimento
- Elevadas taxas de deposição;
- Elevada ligação metalúrgica;
- Economia de energia em relação ao processo de AT por plasma de arco não-transferido.

DESVANTAGENS:

- Instalação em ambiente de proteção acústica;
- Ocorrencia de alteração microestrutural do substrato;
- Apenas realizado em substratos eletricamente condutivos e que suportam alguma deformação.

II.2.3. Aspersão Térmica a Laser:

Processo também conhecido como PROTAL (Projeção Térmica Assistida por Laser), combina a limpeza, ativação e faixas de camadas em uma única operação, tornando mais rápido, econômico e menos prejudicial ao ambiente do que processos convencionais [26].

No processo a Laser, inicialmente o substrato é tratado com um pulso de laser de alta-energia. Um feixe de laser, com um comprimento de onda de 1064 μm e uma duração de pulso de somente 10 ms, evapora a camada de graxa, separa o óxido que se estende em camadas e remove a camada atômica superior por meio de separação, sem aquecer o metal base a um grau apreciável. Abaixo pode ser observado um esquema desse processo Figura II.9 [26].

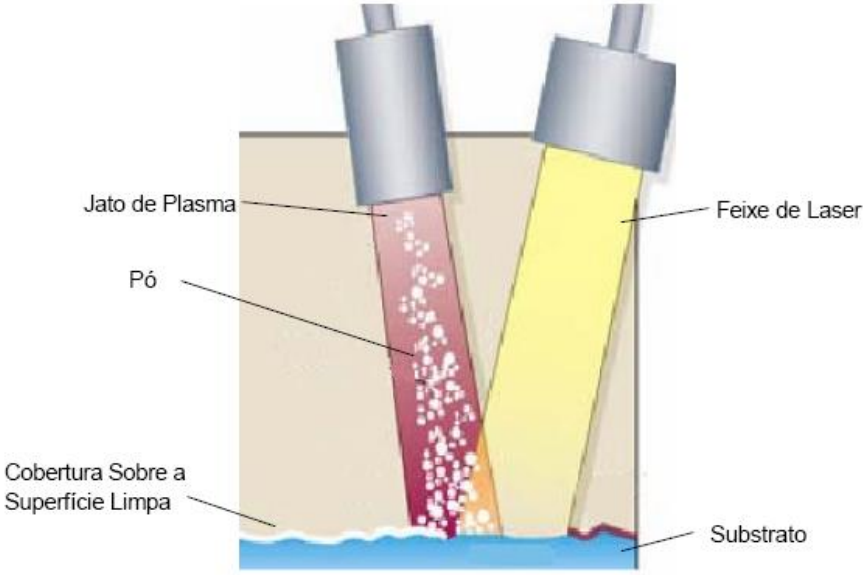


Figura II.9: Esquema da AT pelo processo a Laser [26].

Com este processo, a diferença está no tempo, entre a preparação da superfície e a AT propriamente executada. Dependendo do substrato, uma redução na força adesiva já implica em resultados da ordem de 100 ms, assim a camada deve ser aplicada imediatamente depois de tratamento de laser. Por isto, o laser óptico é acoplado com uma tocha de protoplasma e montado em um robô [26].

Esse processo elimina a necessidade de limpeza, reduz a probabilidade de contaminação da peça, reduz o custo, além de possuir baixo consumo de energia. Porém é necessária a utilização de um sistema robotizado e a camada deve ser aplicada logo após o tratamento feito com o próprio laser.

II.2.4. Comparativo entre os processos de Aspersão Térmica

É possível listar as principais características, positivas e negativas, de cada processo de aspersão térmica, e por fim, compará-las sob a ótica de vários parâmetros de trabalho. De forma geral, essa síntese de informações ajuda na escolha do tipo de processo de aspersão térmica a ser utilizada, em função de parâmetros como: tipo de revestimento, tipo de finalidade do material, temperatura de serviço, infraestrutura disponível, etc.

A Tabela II.4 indica comparações entre as propriedades de vários processos de aspersão térmica, e a Tabela II.5 relaciona algumas das principais características dos processos de aspersão térmica.

Tabela II.4: Comparativo entre as propriedades dos processos de Aspersão Térmica [4].

Processos	Vazão de gases (m^3/h)	Temp. de chama média (ºC)	Velocidade de impacto (m/s)	Aderência Relativa (0 a 10)	Coesão Interlamelar (Baixa a Muito alta)	Teor de Óxidos (%)	Custo relativo (0 a 10)	Taxa de aspersão (kg/h)	Energia (kW/kg)
Chama (pó)	11	2.200	30	3	Baixa	6	3	7	11 a 22
Chama (arame)	71	2.800	180	4	Média	4	3	9	11 a 22
Arco (arame)	71	5.500	240	6	Alta	0,5 a 3	1	16	0,2 a 0,4
Plasma	4,2	5.500	240	6	Alta	0,5 a 1	5	5	13 a 22
Detonação	11	3.900	910	8	Muito alta	0,1	10	1	220
HVOF	28 a 57	3.100	610 a 1060	8	Muito alta	0,2	5	14	22 a 200
Plasma de alta energia	17 a 28	8.300	240 a 1220	8	Muito alta	0,1	4	23	9 a 13
Plasma a vácuo	8,4	8.300	240 a 610	9	Muito alta	ppm	10	10	11 a 22

Tabela II.5: Características dos processos de Aspersão Térmica [26].

Processo	Característica
Detonação	Operações podem ser automatizadas.
	Operações podem ser controlados a distância.
	Ambiente necessita de proteção acústica.
	Alto nível de ruído, acima de 150 dB.
Chama Oxiacetilênica	Oxidação das partículas quando transportadas pelo ar comprimido.
	Aderência prejudicada.
	Necessário uso de gás inerte para o transporte das partículas.
Arco Elétrico	Possui as mesmas características da chama oxiacetilênica.
HVOF	Devido a utilização dos combustíveis (propileno, propano e querosene), requer maior atenção a segurança da instalação.
Plasma	Melhor qualificação do operador.
	Proteção extra ao operador, devido a energia liberada.

II.3. Preparação do Substrato

Uma das principais etapas responsáveis pela obtenção de revestimentos com boas propriedades é a preparação das superfícies. Após a escolha do processo de aspersão térmica e do material de deposição, a próxima etapa é a preparação da superfície do substrato. O principal mecanismo responsável pelo processo de adesão bem sucedido é a ancoragem mecânica. A qualidade da ancoragem mecânica é diretamente proporcional a adesão do revestimento ao substrato.

Existem quatro principais fatores, listados abaixo, que influenciam diretamente na adesão do revestimento [14]:

1. Limpeza;
2. Texturização;
3. Camada de Ligação;
4. Preaquecimento.

II.3.1. Limpeza

O primeiro passo na preparação de um substrato para aspersão térmica é a eliminação de todos e quaisquer contaminantes presentes na superfície do substrato. Portanto, devem ser removidos todos os resíduos de: camadas de óxidos, ferrugem, umidade, poeira, óleo, graxa, tintas e pintura. A superfície dos materiais metálicos quando expostas ao ar atmosférico mesmo em um intervalo de tempo muito pequeno, na faixa de milésimos de segundo, adquire um filme de óxido e sobre esta película agrega-se água, óleo, poeira, e outros contaminantes, este conjunto de camadas é nomeada de superfície real [4] [10] [14]. Portanto, após a remoção de todos os contaminantes, a superfície deve ser mantida limpa até a aplicação do revestimento.

Existem várias categorias de limpeza, que são escolhidas com relação à qualidade esperada do revestimento. As normas ABNT NBR 6405 [28], ISO 8501-1 [29] auxiliam na obtenção das categorias de limpeza, prevendo a inspeção de superfícies através de padrões comparáveis visualmente [10] [14].

De forma geral, o processo de limpeza do substrato pode ser dividido em duas categorias, listadas abaixo:

1. Limpeza Mecânica;
2. Limpeza Química.

II.3.1.1. Limpeza Mecânica

O processo de limpeza mecânica se baseia nos fundamentos de abrasão, onde camadas da superfície de um material são removidas pela ação de um material de maior dureza. Esse processo pode ser observado em procedimentos mecânicos manuais, como: escovação, raspagem, martelamento, e automatizados como: unisagem, polimentos ou jateamento abrasivo.

De forma geral, o jateamento abrasivo é o processo mais corriqueiramente utilizado para limpeza superficial mecânica de metais em larga escala. O jateamento abrasivo consiste no processo de projeção de partículas de materiais mais duros, através de ar comprimido. Maiores capacidades de aderência são obtidas utilizando abrasivos que proporcionam rugosidade adequada, sem contaminar a superfície do substrato. Os abrasivos à base de óxido de alumínio são normalmente os que melhor se adequam a essa qualidade [30].

Alguns parâmetros devem ser considerados para a seleção correta do abrasivo utilizado no jateamento abrasivo. Deve-se considerar o tipo de substrato, a condição da superfície antes da limpeza, a técnica de jateamento abrasivo utilizada, os graus de limpeza e de rugosidade desejados com o jateamento e a reutilização ou não do abrasivo. Além disso, os abrasivos devem estar limpos, pontudos e cortantes, sem umidade, livres de óleo, graxa, e outros contaminantes [31].

Óxidos refratários pontudos, com arestas cortantes, podem ficar encravados na superfície de materiais macios, como: alumínio, zinco ou ligas de magnésio. O ferro de coquilha, que arredonda ao invés de fraturar durante o impacto, é melhor para limpeza de substratos com dureza inferior à 45 HRC. O abrasivo de ferro coquilhado cria, em geral, maiores tensões no substrato que o óxido de alumínio. Por essa razão, ele não deve ser utilizado em peças finas, que podem empenar pelo jateamento [19].

O formato das partículas do abrasivo é um dos principais fatores para o sucesso da aderência do revestimento. O impacto de partículas com formato angular proporciona a remoção do material da superfície, formando mais irregularidades e pontos de ancoramento mecânico vantajoso à aderência do material de deposição, aumentando a energia da base de ancoramento [30].

O ângulo de jato abrasivo deve estar contido entre 75 e 90º. A distância do bocal da pistola ao substrato pode se encontrar entre 10 a 30 cm, de acordo com o tamanho e o tipo de abrasivo usado, a abertura do bocal e a capacidade do equipamento. O jateamento excessivo pode resultar em textura de superfície inadequada, sendo o controle realizado por inspeção

visual. Segundo a norma Petrobras 2568 [32] um tempo de 3 a 4 s é normalmente suficiente para conferir a rugosidade necessária.

A norma ISO 8501-1 [29] classifica graus de preparação de superfície e, entre os citados na norma, o grau Sa (limpeza por jateamento abrasivo) é o mais comumente utilizado na limpeza de superfícies antes da deposição metálica. A limpeza Sa é classificada em:

Grau Sa 1: Quando examinada a olho nu, a superfície deve estar isenta de óleo, gordura, sujeiras visíveis, carepa de laminação, ferrugem, tinta e matérias estranhas de fraca aderência.

Grau Sa 2: Quando examinada a olho nu, a superfície deve estar isenta de óleo, gordura, sujeiras visíveis e de grande parte da carepa de laminação, ferrugem, tinta e matérias estranhas. Todos os contaminantes residuais devem permanecer firmemente aderentes.

Grau Sa 2½: Quando examinada a olho nú, a superfície deve estar isenta de óleo, gordura, sujeiras visíveis e também da carepa de laminação, ferrugem, tinta e matérias estranhas. Quaisquer resíduos remanescentes de contaminação devem aparecer somente como ligeiras marcas sob a forma de manchas ou riscos.

Grau Sa 3: Quando examinada a olho nu, a superfície deve estar isenta de óleo, gordura, sujeiras visíveis e também da carepa de laminação, ferrugem, tinta e matérias estranhas. A superfície deve apresentar uma cor metálica uniforme.

Todas as áreas do substrato que não devem passar pelo processo de jateamento abrasivo, devem ser protegidas com uma cobertura adequada. Poeira e material abrasivo presentes na superfície do substrato devem ser removidos por jato de ar após o jateamento e antes da aspersão propriamente dita. Portanto, a superfície deve ser protegida de contaminações provenientes do transporte, armazenamento e manuseio, pois do contrário ocorrerá recontaminação [4] [14]. A Tabela II.6 apresenta alguns parâmetros de jateamento para a obtenção da rugosidade desejada.

Tabela II.6: Relação de certos parâmetros de jateamento abrasivo [28].

Tamanho do abrasivo (mesh)	Material abrasivo	Pressão do ar		Diâmetro do bocal		Tipo do equipamento	Substrato	Rugosidade R_a	
		(psi)	(kPa)	(pol)	(mm)			(pol) 1000	mm
24	Óxido de alumínio	60	414	5/16	7,9	Pressão	Aço	500	13
60	Carbeto de Silício ou óxido de alumínio	60	414	5/16	7,9	Sucção	Inox	250	6
80	Óxido de alumínio	60	414	5/16	7,9	Plástico	Plástico	250	6

II.3.1.2. Limpeza Química

A limpeza química é dividida em três categorias: detergência, desengraxe e decapagem ácida, que são comentados abaixo:

- Detergência ou limpeza alcalina: é um dos processos mais eficientes para a remoção de camadas de óleos, graxas, pós e partículas de metais presentes na superfície do substrato.

- Desengraxamento: remove as impurezas através de solventes a quente, sendo eficiente na remoção de óleos ou graxas com grau de contaminação leve. De forma geral, existem quatro categorias de processos de desegraxamento, listados abaixo:

    - Por vapor;
    - Associado a um jato de solvente em câmara de vapor;
    - Associado a imersão em solvente quente a vapor;
    - Líquido/Vapor.

- Decapagem ácida: excelente na remoção de camadas de óxidos, hidróxidos e sulfetos. Essa etapa deve ser realizada imediatamente após o desengraxe. O ideal é que o reagente remova a camada de óxido sem atacar a superfície a ser aspergida.

II.3.2. Texturização

Após o processo de limpeza, e anteriormente à aplicação do revestimento, a superfície deve apresentar rugosidade apropriada para proporcionar uma adesão de qualidade ao revestimento. Em geral a rugosidade apropriada já é alcançada após a limpeza mecânica, entretanto, é importante ressaltar que a etapa de texturização é um dos principais responsáveis pela boa aderência do revestimento [14].

A superfície com elevada rugosidade possui maior área de contato superficial do que uma superfície sem tratamento. As partículas serão aderidas mais facilmente em superfícies com elevada rugosidade, pois terá mais pontos de ancoramento mecânico, devido a área de contato ou zona ativa.

A textura superficial pode ser avaliada utilizando diversos tipos de aparelhos (ópticos, laser, eletromecânicos), sendo os últimos os mais utilizados. A ferramenta utilizada para medição da rugosidade é chamada de rugosímetro, podendo ser manual ou de bancada.

A norma ABNT NBR 6405 [28] informa os principais parâmetros utilizados para a avaliação quantitativa e qualitativa da rugosidade superficial. Estes estão listados a seguir:

- Rugosidade média (R_a): Esse parâmetro é calculado através da média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i) dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média de medição (l_m). A Figura II.10 demonstra esta medição. A Tabela II.8 apresenta os valores mínimos de comprimentos

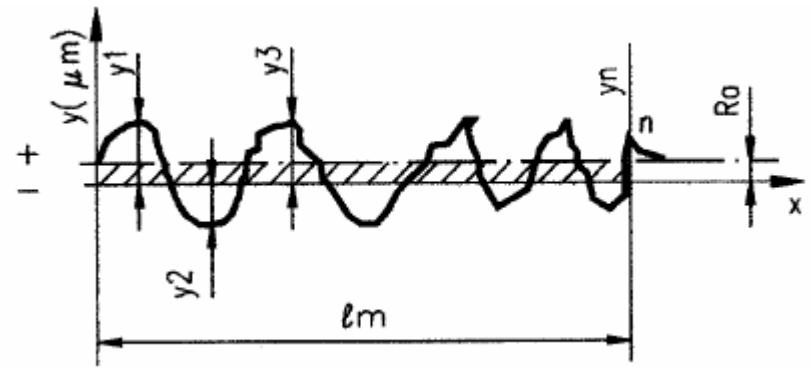


Figura II.10: Ilustração do método de medição de R_a [28].

A expressão matemática que representa R_a é dada pela equação (1) abaixo.

$$R_a = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i \qquad (1)$$

Tabela II.7: Relação entre R_a e comprimentos mínimos de amostragem [28].

Rugosidade média R_a (µm)	Comprimento de amostragem l_e (mm)	Percurso de medição l_m (mm)
Até 0,1	0,25	1,25
De 0,1 até 2	0,8	4
De 2 até 10	2,5	12,5
Acima de 10	8	40

- Rugosidade média parcial (R_z): corresponde à média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial (Z_i), sendo Z_i equivalente à soma dos valores absolutos das ordenadas da linha média, existente em um comprimento de amostragem (l_e). Matematicamente, a expressão é dada pela equação (2) abaixo.

$$R_z = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5}{5} \tag{2}$$

- Máxima distância pico vale (R_y): É o somatório da máxima altura e máxima profundidade de rugosidade dentro do comprimento de avaliação.

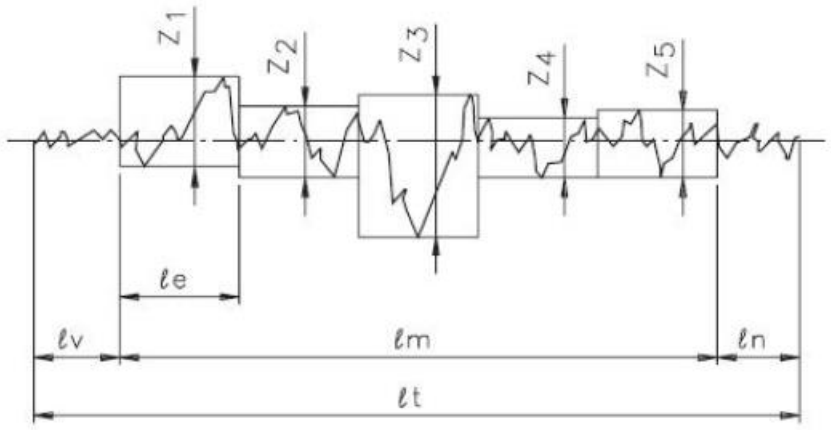


Figura II.11: Ilustração da medição dos parâmetros R_y e R_z [28].

Tabela II.8: Valores de R_a para comprimentos mínimos de amostragem [28].

Rugosidade Média R_a (µm)	Mínimo comprimento de amostragem (mm)
0 a 0,3	0,25
0,3 a 3	0,8
Maior que 3	2,5

De maneira geral, a rugosidade superficial mais adequada para a maioria dos revestimentos é aquela que apresenta R_a entre 2,5 a 13 µm. Para um mesmo revestimento com espessura de camada menor, são necessários valores de rugosidade mais baixos, de 1,3 µm. Para revestimentos de plásticos em metais ou ligas de baixo ponto de fusão, como zinco, a rugosidade recomendada é de no máximo 6 µm em R_a.

II.3.3. Camada de Ligação

Camadas de ligação são normalmente aplicadas em materiais muito duros para passarem por processos de texturização, ou tão moles que sofreriam deformação. Os materiais de ligação são aqueles que têm afinidade para formar com o material do substrato uma forte ligação interatômica, física ou de difusão. Geralmente são finos e responsáveis por produzir uma superfície rugosa para a adesão do revestimento.

Normalmente as camadas de ligação são aplicadas, em aços endurecidos por tempera e superligas. Tem seu uso requerido também onde o jateamento abrasivo ou a usinagem não podem ser utilizados, devido a dificuldade de acesso ou na possível ocorrência de distorções excessivas, ocasionadas pela dureza do substrato [14].

Apesar da camada de ligação simplificar o processo de AT, eliminando a necessidade de preparação da superfície, através de jato abrasivo ou usinagem, fortes indicações apontam para a preparação combinada para obter a máxima adesão necessária. A preparação combinada consiste em uma usinagem grosseira do substrato seguido de jateamento abrasivo e após aplicação de camada de ligação. Essa combinação proporciona camadas de ligação espessas e mais resistentes [33].

II.3.4. Pré-aquecimento

O pré-aquecimento proporciona a remoção de umidade, queima e volatiliza as graxas e óleos acumulados junto à superfície do metal. Além de expandir o substrato que, após a adesão do revestimento, se contrai reduzindo tensões residuais criadas pelo revestimento durante o resfriamento [4]. Em outros casos, ele pode retardar o resfriamento das partículas para melhorar o contato substrato/partícula e promover ligação térmica. Entretanto, o material não pode ser exposto a altas temperaturas, por tempos longos, podendo resultar na produção de espessas camadas de óxidos. Na prática, sugere-se que as superfícies sejam pré-aquecidas a temperaturas entre 100 e 150°C. Este pré-aquecimento pode ser feito por uma chama redutora da própria pistola de aspersão térmica [4] [5].

II.4. Características dos revestimentos depositados por Aspersão Térmica

Os revestimentos aspergidos são gerados por depósitos de sucessivas camadas de materiais fundidos e semifundidos que se achatam e solidificam, resultando em uma macroestrutura conhecida como lamelar ou lenticular. Durante o impacto das partículas aquecidas e aceleradas sobre o substrato, estas se achatam na forma de finas panquecas. Ao incidirem sobre o substrato, essas pequenas panquecas se resfriam a uma velocidade extremamente alta e se ancoram mecanicamente nas irregularidades da superfície [7].

A estrutura típica de revestimentos aspergidos é constituída de lamelas do material aspergido entremeada de inclusões de óxidos, microtrincas, partículas sólidas e porosidade. A Figura II.12 mostra, de maneira esquemática, a estrutura típica de um revestimento produzido por aspersão térmica, onde estão identificados seus principais defeitos. Os valores obtidos nos testes de adesão e a quantidade de defeitos indicam diretamente a qualidade do revestimento e do processo de aspersão.

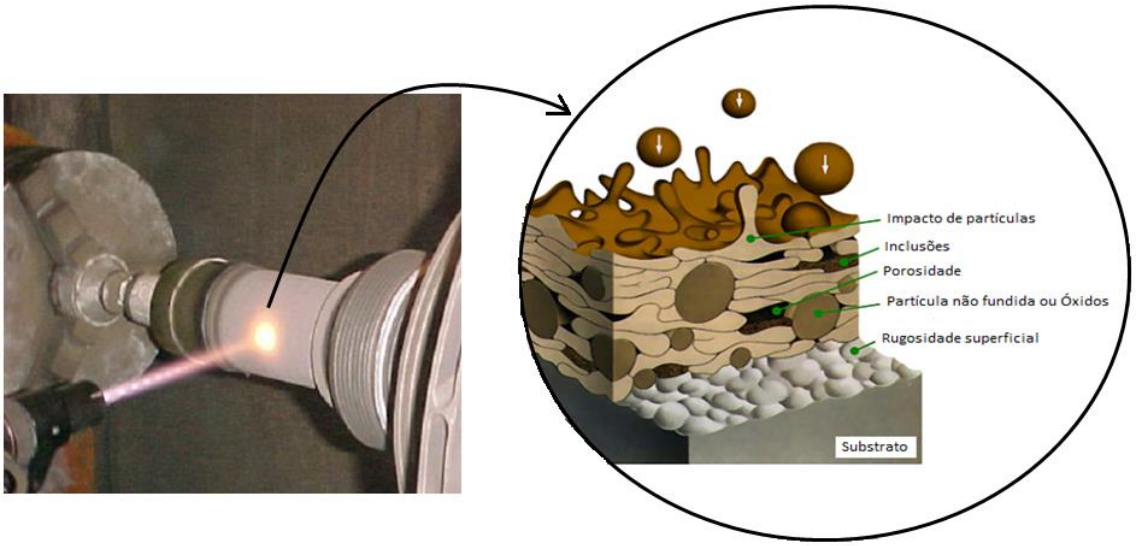


Figura II.12: Estrutura típica de um revestimento produzido por aspersão térmica [20].

No impacto com o substrato ou com o próprio revestimento, essas partículas não se espalham e não preenchem as irregularidades por completo, causando porosidade e prejudicando as propriedades mecânicas e a integridade da camada, pois um jato resulta em uma ampla faixa de distribuição de velocidades e temperaturas. Esse é um dos motivos pelo qual os parâmetros de aspersão, para a maioria dos métodos de deposição devem ser otimizados, de tal forma que a grande maioria das partículas seja fundida no jato [9].

A variação nos parâmetros de aspersão dificulta a comparação de resultados e características, pois uma série de variáveis estão envolvidas como, por exemplo: material do revestimento, distribuição dos tamanhos de partículas a serem aspergidas, velocidade de

solidificação, velocidade do fluxo, pressão e tipo de gás. Além das características do substrato que também influenciam diretamente na qualidade do revestimento como material, temperatura, rugosidade e limpeza.

Para que os revestimentos aspergidos garantam uma boa qualidade, faz-se necessário à observação de vários aspectos antes e durante a deposição dos materiais [34]. As principais características dos revestimentos realizados a partir da aspersão térmica serão citadas e comentadas abaixo.

II.4.1. Aderência

A capacidade do revestimento em resistir ao arrancamento quando solicitado em tração, é normalmente denominado de aderência. A aderência consiste, por definição, na adesão entre as partículas e o substrato e a coesão entre as partículas das várias camadas sobrepostas. Portanto, pode-se afirmar que as propriedas físicas e o comportamento mecânico de um revestimento aspergido dependem da: aderência entre as lamelas e o substrato, da resistência coesiva entre as lamelas, do tamanho e morfologia dos poros, da presença de trincas e da microestrutura das lamelas [16].

Na análise da aderência do revestimento normalmente considera três mecanismos, de acordo com a natureza das forças atuantes: mecânica, difusão e adesiva. A aderência é, portanto, uma combinação destes três mecanismos. No instante do impacto das partículas aquecidas e aceleradas contra o substrato, essas se achatam em uma forma lenticular, resfriam-se rapidamente e ancoram mecanicamente, por intermédio de forças mecânicas, nas irregularidades da superfície, como mostra o esquema da figura II.13 [35].

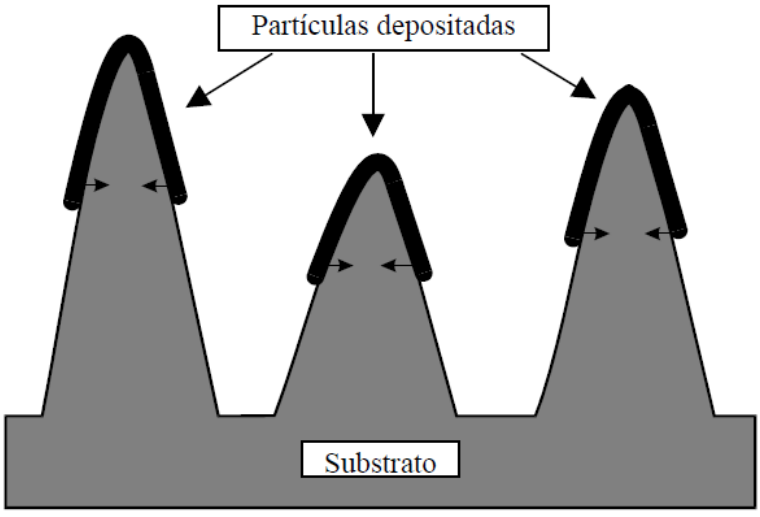


Figura II.13: Esquema do ancoramento mecânico da panqueca na superfície rugosa do substrato [35].

A aderência ou ligação adesiva ocorre entre os átomos das lamelas e do substrato, resultando na ação das forças de Van der Waals, ocorrendo somente se o contato for bem próximo e constante. As superfícies devem se aproximar uma das outras, atingindo níveis atômicos, na faixa de 0,5 nm. Levando em consideração que as forças de Van der Waals produzem ligações fracas, é fundamental que as superfícies estejam limpas proporcionando o melhor contato possível [36].

A aderência do tipo químico-metalúrgica, ou ligação por difusão, pode ocorrer em virtude do processo de microssoldagem, ocasionado pela fusão localizada e difusão atômica com formação de soluções sólidas com, inclusive, compostos intermetálicos, caracterizando esse mecanismo de aderência. A difusão ocorre, principalmente, pela presença de lacunas em alta concentração, devido a rápida solidificação das lamelas. Como a difusão é um processo termicamente ativado, a elevada temperatura aumenta a probabilidade da ocorrência deste fenômeno.

A qualidade dos revestimentos depende, fundamentalmente, do tratamento prévio da superfície do substrato e das condições de operação da aspersão térmica. Uma das propriedades importantes dos revestimentos depositados, também responsável pela qualidade deste, é a sua aderência com o substrato. Os dois principais tipos de falhas de revestimento são trincas e o descolamento do revestimento do substrato. Portanto, a avaliação da integridade estrutural dos revestimentos é importante para garantir a segurança e confiabilidade de peças revestidas [37].

II.4.2. Porosidade

Como os revestimentos obtidos por aspersão térmica são formados por superposição de partículas achatadas, eles apresentam um alto grau de porosidade. É comum os revestimentos realizados por aspersão térmica apresentem porosidade de até 20%. Esta porosidade consiste tanto em cavidades isoladas, como em cavidades interconectadas capazes de permitir que líquidos e até gases penetrem até o substrato, tal fato constitui um grave problema, pois a penetração de espécies agressivas irá acelerar o processo de degradação do revestimento [16] [38].

A quantidade de poros nos revestimentos depende do material e das condições de aspersão térmica. Resultados experimentais [39] sugerem a existência de dois tipos de poros: grosseiros e finos. Os grosseiros são mais frequentes quando, no impacto, as partículas não estão completamente fundidas, formando o incompleto preenchimento dos intertícios entre as partículas previamente depositadas. Já para os finos é inerente as características dos

processos dos revestimentos aspergidos, e são considerados como o incompleto contato entre as lamelas durante o processo de formação do revestimento.

Estudos elaborados por McPherson [40] [41] estimaram que a área real de contato da lamela com o substrato e posteriormente com as outras camadas de revestimento é de 30% da área disponível em suas redondezas e medidas diretas de porosidade interlamelar mostraram que a porosidade possui um tamanho de 10 a 100 μm.

Como a porosidade é inerente à maioria dos processos convencionais de aspersão térmica, Vreijling [42] em seus estudos classificou em sete os tipos de porosidades nos revestimentos produzidos por aspersão térmica, de acordo com o mecanismo de formação, conforme mostra a Figura II.14.

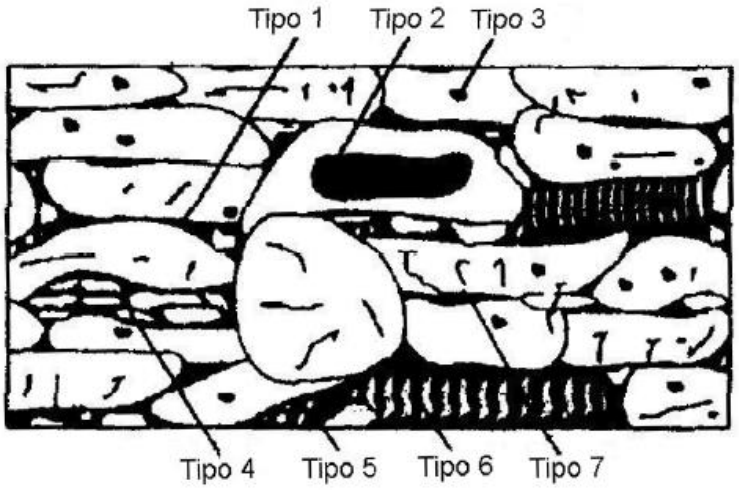


Figura II.14: Tipos de porosidade em um revestimento aspergido termicamente [16] [40] [41].

- Tipo 1: porosidade formada entre as lamelas e causada pelo empilhamento de partículas separadas. Este tipo de porosidade pode estar relacionado ao tamanho da partícula aspergida e a característica do material de alimentação.
- Tipo 2: porosidade formada por bolsas de gás preso causadas pela turbulência do fluxo de gás durante o processo de aspersão.
- Tipo 3: porosidade manifestada na forma de bolhas de gás causada pela dissolução do gás no metal fundido que se desenvolveram com o resfriamento do metal.
- Tipo 4: porosidade causada pela desintegração de partículas sólidas após o impacto, durante o processo de deposição.
- Tipo 5: porosidade ocasionada pela condensação de partículas parcialmente evaporadas e que foram identificadas como partículas contendo resíduos de pó.
- Tipo 6: porosidade resultante de contração de solidificação.

- Tipo 7: porosidade que resulta em microtrincas, independente de sua origem de formação.

A formação de revestimentos contendo porosidade está relacionada com os parâmetros de cada processo de aspersão térmica, tais como: temperatura da chama ou arco elétrico, gás de transporte, velocidade das partículas, distância pistola/substrato e qualidade e limpeza do substrato a ser revestido. Aspergindo em atmosferas de baixa pressão e/ou alta velocidade das partículas, pode-se em alguns casos, reduzir a porosidade, principalmente a grosseira, porém não pode eliminá-la completamente (porosidade fina).

A porosidade normalmente deteriora as propriedades mecânicas dos revestimentos. Algumas como: condutividade térmica, elétrica e o módulo de elasticidade, são reduzidas pela quantidade de poros, que diminuem a área transversal efetiva do revestimento. Essas propriedades são bem maiores em materiais em seu estado brutos, em detrimento aos aspergidos. A condução ocorre somente entre as verdadeiras regiões de contato entre as lamelas.

A análise quantitativa da porosidade pode ser realizada através da observação de amostras utilizando microscópico ótico, auxiliado por analisador de imagens. O equipamento permite quantificar os seguintes parâmetros: área da camada examinada, fração de área de poros, área média dos poros e número de poros [16].

As mais comuns fontes de porosidade são:

- Ângulo de aspersão: A porosidade do revestimento diminui quando o ângulo se aproxima de 90º. Sendo 45º o ângulo de impacto mínimo aceitável, pois a partir deste valor propriedades como força de ligação e coesão do revestimento ficarão comprometidas. Na Figura II.15 é mostrado um esquema com diferentes ângulos de aspersão.

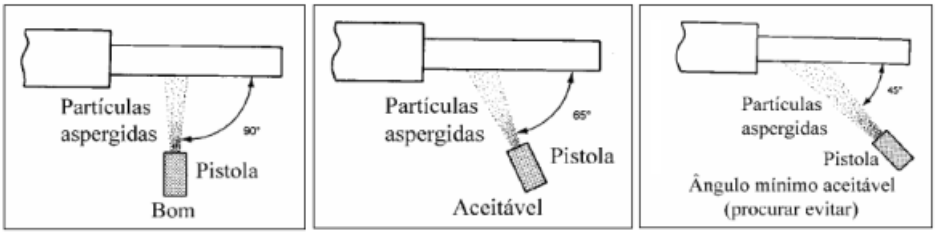


Figura II.15: Ângulos da pistola de aspersão [16].

- Partículas sólidas ou não fundidas: Dependendo da temperatura das partículas, as gotículas que irão de encontro ao substrato/revestimento podem se encontrar

desde o estado fundido até o estado sólido. As partículas no estado líquido escoam facilmente e fecham a maior parte dos vazios. Por outro lado, as partículas sólidas irão aderir superficialmente na rugosidade do depósito de forma irregular, gerando vazios no revestimento. A Figura II.16 mostra o esquema do processo de aspersão térmica, e as principais características microestruturais que compõem o revestimento [16].

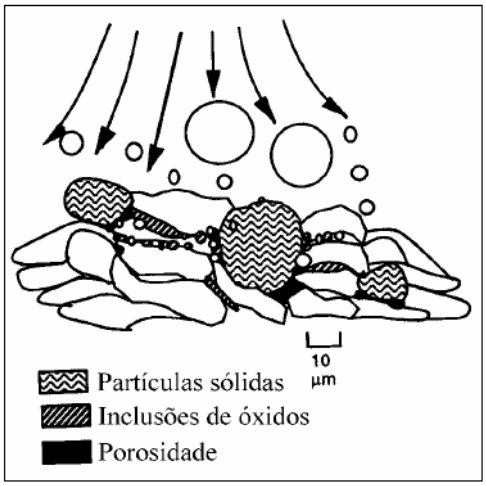


Figura II.16: Arranjo da formação de revestimento apresentando partículas sólidas, inclusões de óxidos e porosidades [16].

II.4.3. Oxidação das Partículas

A formação de óxidos, nos processos de AT está correlacionado com a atmosfera pela qual as partículas aspergidas e por fim depositadas estão fundidas ou semi-fundidas. Então como as partículas estão quentes, o contato com o ar ambiente faz com que as partículas sejam cobertas por filmes de óxidos. Entre o aquecimento das partículas na pistola e sua deposição no substrato, dependendo do seu grau de fusão e da velocidade de resfriamento, podem ocorrer diferentes intensidades de oxidação e ativação térmica.

A formação de óxidos está relacionada com a atmosfera pela qual são transferidas e depositadas as partículas fundidas ou superaquecidas no bico das pistolas de cada processo de aspersão térmica [43]. As principais fontes de oxidação esquematizadas na Figura II.17 estão identificadas abaixo:

- 1° Mecanismo: fonte de calor (arco elétrico), partículas que têm o primeiro e mais relevante contato com ambiente oxidativo. Exclusivo para o processo ASP.
- 2° Mecanismo: considerando a oxidação entre a partícula e o gás de transporte (geralmente ar comprimido). Há a reação entre a partícula e oxigênio ou

elementos oxidantes presentes nos gases expelidos pela pistola. Ambiente que envolve a zona de transferência.

- 3° Mecanismo: o ar do meio ambiente que envolve a zona de transferência das partículas devido ao fluxo turbulento dos gases.
- 4° Mecanismo: partículas e/ou camadas já ancoradas ao substrato e que ficam expostas ao ar do meio ambiente após o deslocamento da partícula.

A oxidação pelos 1° e 2° mecanismos é considerada como sendo o tempo em que a partícula leva até atingir o substrato e sendo aproximadamente de 0,001 segundo, pelo 3° mecanismo o tempo para oxidação considerada em torno de 1 segundo [43].

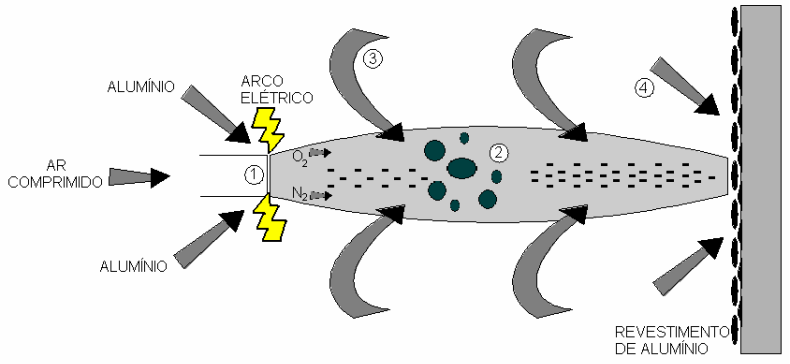


Figura II.17: Esquema dos mecanismos de oxidação predominantes no processo de aspersão térmica [43].

Os óxidos encontrados nos revestimentos metálicos são geralmente observados por intermédio de microscopia ótica como fases escuras e alongadas e podem ser vistos na seção transversal do revestimento, paralelos ao substrato. São produzidos pela interação partícula aspergida e atmosfera e/ou pelo aquecimento da superfície do revestimento durante a deposição. Interação entre as partículas quentes com o ambiente, geralmente ar, faz com que as superfícies das partículas sejam cobertas por filmes de óxidos. Quando as partículas espalham-se no impacto com o substrato ou com camadas já formadas de revestimento, a superfície do filme óxido rompe e eles tornam-se parte do depósito como gotículas solidificadas entre camadas do revestimento [16] [44].

As inclusões de óxidos aumentam a dureza do revestimento e isto pode gerar revestimentos quebradiços, pois os óxidos fraturam facilmente. Caso o teor de óxidos seja bastante elevado, pode haver uma dificuldade de coesão entre as camadas depositadas, provocando uma diminuição da força coesiva do revestimento. Sendo assim, inclusões de óxidos são normalmente consideradas prejudiciais às propriedades dos revestimentos, pois diminuem a adesão/coesão e aumentam a porosidade do revestimento. Entretanto, em

algumas aplicações inclusões de óxidos são desejadas, pois podem aumentar a resistência ao desgaste e diminuir a condutividade térmica [4].

A seguir, alguns parâmetros que podem minimizar as inclusões de óxidos [4] [16]:

- Remoção de ambiente reativo através do uso de câmaras de gases inertes;
- Redução da temperatura média das partículas pela diminuição do poder calorífico dos jatos de aspersão;
- Redução da temperatura na superfície substrato/revestimento usando jatos de ar ou aumentando a velocidade de aspersão;
- Uso de partículas de pó para a alimentação com tamanho adequado. Partículas grandes têm uma razão da área superficial por volume menor, o que minimiza a quantidade total de óxidos;
- O controle da distância entre a pistola e o substrato é de vital importância para a qualidade dos revestimentos. Fatores como oxidação em movimento, perda de energia cinética durante o transporte das partículas e temperatura da partícula no impacto estão relacionados com a distância. Pistolas automatizadas evitam tais problemas.

II.4.4. Pós-tratamento dos Revestimentos

Como a porosidade é inerente aos processos de aspersão térmica, é comum a utilização de revestimentos orgânicos (selantes e/ou esquemas de pintura) logo após a deposição metálica a fim de vedar ou fechar os poros. Este procedimento é de grande importância quando o revestimento metálico for utilizado em ambientes corrosivos, pois a vedação dos poros reduz a área exposta minimizando a corrosão [16].

Os revestimentos aspergidos podem apresentar porosidade abaixo de 1%, mas seus valores mais comuns de porosidade estão entre 1 e 15%. E como em alguns casos é possível reduzir os níveis de porosidade, mas não eliminá-los utiliza-se a selagem, que é um dos tratamentos realizados após a AT com a intenção de realizar uma vedação dos poros reduzindo a área exposta, minimizando a corrosão.

Em geral a função dos selantes é a de prolongar o valor protetivo do revestimento metálico aspergido, protegendo-a contra incrustações de sujeira ou penetração de umidade ou agente corrosivo nos poros, assim como também na rugosidade superficial da camada [4] [14].

Existem algumas vantagens na utilização de selantes como pós-tratamento dos revestimentos produzidos por aspersão térmica, são elas [45]:

- A penetração do selante nos poros reduz a área total exposta e com isso há redução também da taxa de dissolução do revestimento;
- A superfície fica com uma textura menos rugosa, prevenindo a retenção de sujeiras e outros contaminantes;
- Há uma melhor manutenção do revestimento, que permanece mais limpo através do efeito de ″alisamento″ da superfície;
- O selante pode conter pigmentos e com isso obter coloração;
- O revestimento selado é um sistema protetor completo, não havendo necessidade de pinturas adicionais sobre a superfície.

O bom desempenho dos selantes está diretamente relacionado com as seguintes propriedades [46]:

- Baixa viscosidade (3 poise ou menos para facilitar uma boa penetração);
- Baixa razão de sólidos por volume;
- Caso o selante seja pigmentado, os pigmentos sólidos devem ser pequenos para não impedir o bom escoamento do selante pelos poros;
- O selante deve absorver pouca água para resistir à umidade;
- Deve existir uma compatibilidade entre pigmento e o metal de aspersão;
- O selante deve ser compatível com ambiente de trabalho;
- O selante deve possuir baixa espessura, no máximo 75 μm.

II.4.5. Microtrincas

São normalmente encontradas em revestimentos aspergidos, entretanto, são apenas aceitáveis em cerâmicos. Geralmente, os cerâmicos apresentem uma fina camada de trincas perpendiculares ao plano de lamelas. Essas trincas ocorrem pelas tensões produzidas pela restrição da contração térmica das lamelas, pelo material ajacente, no resfriamento durante a solidificação. Essas trincas normalmente não são formadas em revestimentos metálicos, isso porque a deformação térmica, característica dos metais, é acomodada pelo escoamento plástico [4] [14] [47].

As microtrincas constituídas em revestimentos cerâmicos aspergidos aumentam a flexibilidade do material, permitindo a deformação do mesmo sob tensões térmicas, elevando a tolerância de deformação e resistência à fadiga. Microtrincas no sentido perpendicular as lamelas, aliado a densidade de porosidade no revestimento dificultam o crescimento de trincas no revestimento [14].

Capítulo III – Metodologia Experimental

Neste capítulo serão apresentados os materiais de deposição, amostras, equipamentos e métodos de avaliação dos revestimentos.

III.1. Método de Fabricação

Pelo processo de metalização, por arco elétrico, os revestimentos são formados a partir de ligas metálicas disponíveis em dois arames que se fundem no bico da pistola, por diferença de potencial, constituindo então o revestimento. A Tabela III.1 fornece a composição química dos três arames utilizados na confecção do revestimento.

Tabela III.1: Composição química dos arames utilizados para formar o revestimento. Valores menores do que 0,01% não estão apresentados na tabela.

Arame	Fe (%)	Co (%)	Cr (%)	Ni (%)	B (%)	Mn (%)	W (%)	Mo (%)	C (%)	Si (%)
I	66,1		27		3,5	1,8				1,6
II	65,7		25,7	2,9		1,9		0,8	1,6	1,4
III	3,6	58,4	28,8	1,9		0,9	4,9	0,02	1,1	0,3

Os revestimentos foram realizados pelo processo de aspersão térmica a arco elétrico, que necessita excepcionalmente do encontro de dois arames, e na fusão destes, o revestimento é formado. Inicialmente foi aplicada uma liga intermediária que tem a função de aumentar a aderência do revestimento. A Tabela III.2 detalha as combinações químicas resultante da fusão dos dois arames.

Tabela III.2: Detalhes das combinações estudadas.

Combinação	Revestimento: Combinação dos arames
1	I+ III
2	I + II

Foram aspergidas ligas intermediárias com composição química 95Ni-5Al, compondo-se assim exclusivamente de níquel e alumínio. Essas ligas possuem altas capacidades de aderência com as ligas que formam o revestimento, e com o aço carbono que é o material do substrato [7] [14] [18]. As composições químicas foram escolhidas de modo a atingir propriedades relacionadas à resistência a corrosão e dureza mecânica, devido a demanda por aplicabilidade de materiais aos ambientes marinhos severos.

A escolha das ligas utilizadas na fabricação dos revestimentos deve-se a aplicação proposta aos materiais a serem trabalhados. Neste estudo, foram utilizadas ligas que proporcionavam elevada resistência a corrosão e elevada resistência a fricção. Entretanto, não foram encontradas na literatura muitas fontes que avaliaram detalhadamente seus aspectos metalúrgicos e propriedades mecânicas. Isso se deve também ao fato de que, na literatura de aspersão térmica, a grande maioria dos trabalhos apresentam resultados de análises de ligas de Al, Ti, e Si [13] [24] [27], enquanto outras ligas especiais ainda necessitam de mais estudos.

Para o estudo do revestimento utilizou-se o processo de aspersão térmica a arco elétrico em substrato de aço carbono SAE 1020. Em termos de geometria, foram estudados dois tipos geométricos de corpos de prova, tubo e chapa.

O equipamento possui duas entradas, que são alimentadas simultaneamente por dois carretéis, para deposição do revestimento sobre o subtrato, conforme apresentado na Figura III.1. Os arames têm diâmetro de 2,6 mm, e se encontram enrolados nos carretéis, que com o auxílio de fontes de calor e de gases a elevada velocidade, são aspergidos sob a forma fundida e aquecida sobre o substrato, formando o revestimento.



Figura III.1: Carretéis com os arames de deposição.
Fonte: Acervo do próprio próprio autor.

Após o recebimento da matéria-prima, as amostras passaram pelo processo de limpeza mecânica por jateamento abrasivo grau Sa $2^{1/2}$ utilizando abrasivo de óxido de alumínio G.20, conforme apresentado nas Figuras III.2 e III.3. Após o processo de limpeza mecânica, aplicou-se uma camada de liga intermediária em uma das faces de cada amostra, seguido da aplicação do revestimento com a espessura pré-definida de 1,9 mm, conforme ilustrado nas Figuras III.4 e III.5.



Figura III.2: Amostras tubulares empilhas após jateamento, aguardando a pulverização da liga intermediária.

Fonte: Acervo do próprio próprio autor.

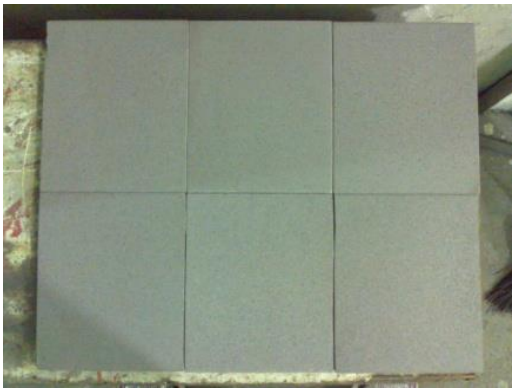


Figura III.3: Amostras planas após jateamento, aguardando a pulverização da liga intermediária.

Fonte: Acervo do próprio próprio autor.



Figura III.4: Medição da espessura da liga intermediária.
Fonte: Acervo do próprio próprio autor.



(a) (b)

Figura III.5: (a) Vista superior das amostras após pulverização da liga intermediaria e (b) Vista frontal das amostras após pulverização da liga intermediaria.
Fonte: Acervo do próprio próprio autor.

Após a deposição dos revestimentos metálicos aplicou-se selante de resina epóxi em metade da superfície de cada chapa e tubo, excluindo os casos dos tubos retificados, que tiveram aplicação de resina em toda sua superfície anteriormente ao processo de retifica. O objetivo do selante é diminuir a porosidade do revestimento proporcionando melhor resistência à corrosão.

A tensão aplicada no processo de aspersão térmica foi de 40 V, enquanto que a corrente ficou próxima de 100 A e a taxa de deposição foi de 3,24 kg/h. O gás atomizante utilizado foi o Argônio. A escolha destes parâmetros foi feita a partir de experimentos anteriores que indicaram ser esta a melhor combinação para os tipos de revestimentos estudados, além de estarem de acordo com a literatura técnica [4] [7] [8]. A Figura III.6 ilustra a amostra após o processo de metalização.



Figura III.6: Amostra retangular posicionada e preparada para a metalização.
Fonte: Acervo do próprio próprio autor.

A Figura III.7 (a) ilustra detalhadamente a aplicação do revestimento pela pistola direcionada à superfície da amostra retangular, e a Figura III.7 (b) ilustra a aplicação do revestimento em amostras tubulares.



(a) (b)

Figura III.7: (a) Aplicação do revestimento em amostras retangulares e (b) Aplicação do revestimento em amostras cilíndricas.
Fonte: Acervo do próprio próprio autor.

A Tabela III.3 fornece os parâmetros utilizados no processo de aspersão térmica de todas as amostras.

Tabela III.3: Valores dos parâmetros utilizados durante a aspersão térmica.

Parâmetros de metalização	Valores Utilizados
Tensão	40 V
Corrente	100 A
Distância de projeção	Aprox. 100 mm
Número de passes	3 a 6
Taxa de deposição	3,24 kg/h
Diâmetro dos arames	2,6 mm

III.2. Materiais

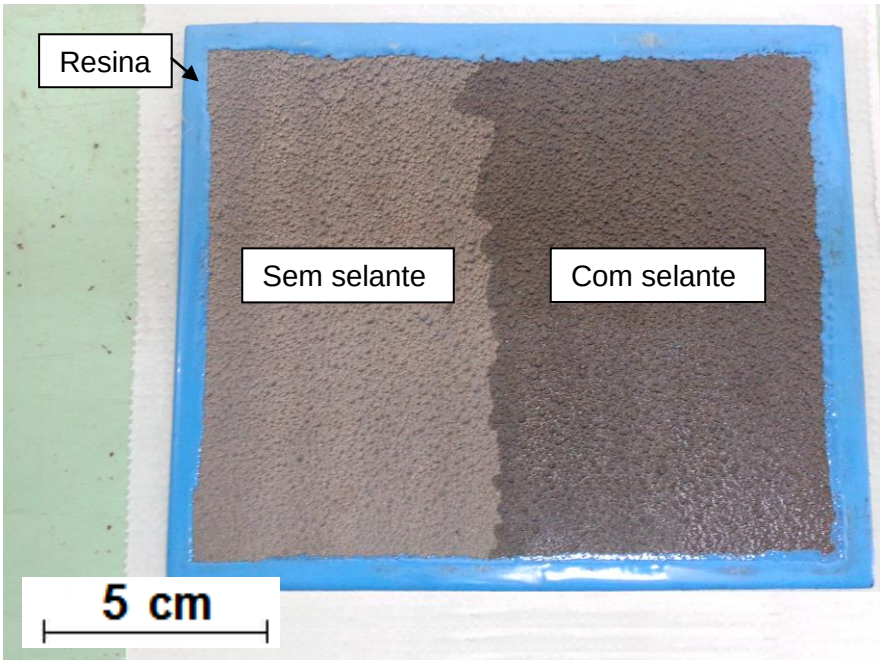
Os materiais utilizados neste estudo estão listados abaixo.

1. **Amostra plana, Figura III.8 (a):**

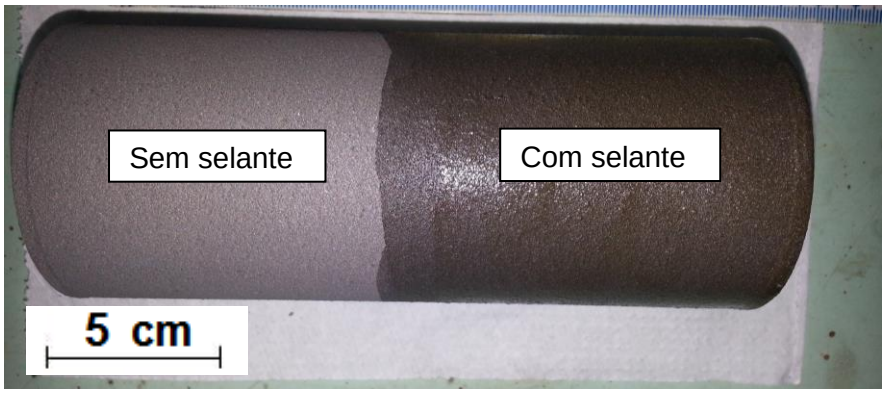
- Substrato de aço carbono SAE 1020;
- Chapa de 100 mm x 150 mm x 4,5 mm;
- Aplicação de selante em metade de todas as amostras.
- Aplicação de resina nos contornos das chapas.

2. **Amostra tubular, Figura III.8 (b) e (c):**

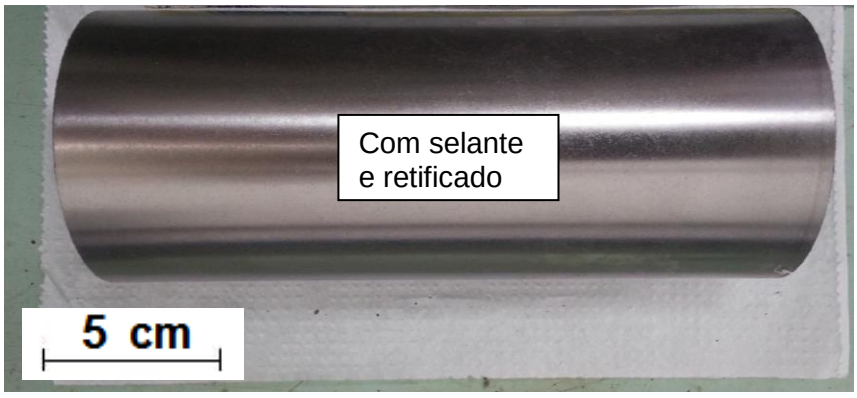
- Substrato de aço carbono SAE 1020;
- Tubo 63,5 mm (2,5 in de diâmetro) x 200 mm x 5 mm;
- Aplicação de selante na metade da superfície das amostras com acabamento sem tratamento após metalização e em toda a superfície das amostras retificadas.



(a)



(b)



(c)

Figura III.8: Amostras estudadas neste trabalho. (a) chapa; (b) tubo com revestimento sem retifica; (c) amostra de tubo retificada.

Fonte: Acervo do próprio próprio autor.

O experimento possui dez modelos diferentes que diferem entre eles pela geometria da amostra e composição química relativa a combinação dos arames. A combinação 1 dos arames é responsável pela formação do revestimento a base de Co e Cr e a combinação 2 é responsável pela formação do revestimento a base de Ni e Cr. Os modelos se encontram listados a seguir:

i. Amostra plana com revestimento a base de Co e Cr com epóxi;
ii. Amostra plana com revestimento a base de Co e Cr sem epóxi;
iii. Amostra plana com revestimento a base de Ni e Cr com epóxi;
iv. Amostra plana com revestimento a base de Ni e Cr sem epóxi;
v. Amostra tubular com revestimento a base de Co e Cr com epóxi;
vi. Amostra tubular com revestimento a base de Co e Cr sem epóxi;
vii. Amostra tubular com revestimento a base de Ni e Cr com epóxi;
viii. Amostra tubular com revestimento a base de Ni e Cr sem epóxi;
ix. Amostra tubular retificada, com aplicação de epóxi antes da retífica, com revestimento a base de Co e Cr;
x. Amostra tubular retificada, com aplicação de epóxi antes da retífica, com revestimento a base de Ni e Cr.

Todas as amostras tiveram aplicação de epóxi em parte de sua área externa, o epóxi é um selante que tem como principal objetivo aumentar a resistência a corrosão dos materiais. A resina de coloração azul tem como objetivo proteger com mais eficácia as bordas das amostras planas. Neste trabalho não foram realizados ensaios de corrosão, portanto, os resultados originados a partir das avaliações deste trabalho, em regiões não seladas, não possuem diferenças com relação ao mesmo material em condição selada.

Não serão analisadas as condições i, iii, v, vii. Resultando no total de seis modelos a serem analisadas neste trabalho. Sugere-se que no futuro, as análises deste trabalho sejam realizadas nas amostras após o processo de corrosão, e comparado com os resultados obtidos posteriormente ao processo de corrosão, resultando nas condições listadas abaixo:

1. Amostra plana com revestimento a base de Co e Cr sem epóxi;
2. Amostra plana com revestimento a base de Ni e Cr sem epóxi;
3. Amostra tubular com revestimento a base de Co e Cr sem epóxi;
4. Amostra tubular com revestimento a base de Ni e Cr sem epóxi;
5. Amostra tubular retificada, com aplicação de epóxi antes da retífica, com revestimento a base de Co e Cr;

6. Amostra tubular retificada, com aplicação de epóxi antes da retífica, com revestimento a base de Ni e Cr.

As amostras foram cortadas, no sentido transversal, utilizando a máquina de corte do Laboratório de Materiais do CEFET/RJ com discos de dureza na faixa de 35 à 50 HR_C apresentada na Figura III.9. Todo o cuidado foi tomado para evitar o aquecimento excessivo da seção de corte, entre a amostra e o disco de corte.



Figura III.9: Máquina de corte utilizada para cortar as amostras.
Fonte: Acervo do próprio próprio autor.

Em seguida, as amostras cortadas foram embutidas com auxílio da máquina de embutimento AROTEC modelo PRE-30, do Laboratório de Materiais do CEFET/RJ, apresentada na Figura III.10. A máquina de embutimento auxilia no processo de compressão, aquecimento e resfriamento do baquelite.



Figura III.10: Máquina de embutimento AROTEC (PRE-30) e frasco de baquelite.
Fonte: Acervo do próprio próprio autor.

Após o embutimento com baquelite, as amostras foram lixadas com a seguinte sequência granulométrica: 100, 220, 320, 400, 600, ilustradas na Figura III.11 (a), e lixadas com a politriz universal modelo Aropol2V, ilustrada na Figura III.11 (b). Após o lixamento, as amostras embutidas foram polidas com abrasivo de pasta de diamante de 6, 3 e 1µm por intermédio da politriz universal modelo Aropol2V, ilustrada na Figura III.11 (c) No caso de estudo de revestimento não é utilizado ataque químico.



(a) (b) (c)

Figura III.11: Ferramentas utilizadas para lixamento e polimento das amostras embutidas.
Fonte: Acervo do próprio próprio autor.

III.3. Caracterização dos Revestimentos

III.3.1. Ensaio de Microdureza Vickers

Os seis modelos de revestimento, embutidos em baquelite, foram analisados pelo ensaio de microdureza Vickers. Doze medições foram realizadas para cada um dos modelos, utilizando uma carga de 300gf, em diferentes pontos do revestimento.

A Figura III.12 exibe o durômetro da Wilson Instruments, modelo 422MVD, utilizado para medição de microdureza Vickers.

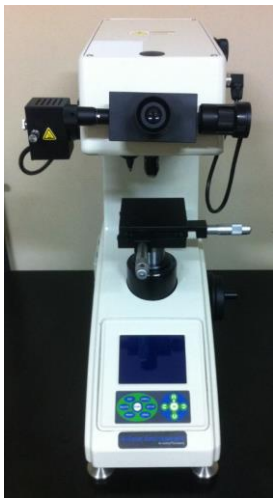


Figura III.12: Durômetro utilizado para medição de microdureza Vickers.
Fonte: Acervo do próprio próprio autor.

III.3.2. Microscopia Ótica

A partir das amostras revestidas e embutidas em baquelite, desenvolvidas anteriormente, e com as medições de dureza já realizadas, os ensaios de microscopia ótica foram realizados no Laboratório de Materiais do CEFET/RJ. As análises foram realizadas na interface entre o substrato, revestimento, liga intermediária e o baquelite. Seu objetivo é mensurar qualitativamente as porosidades, óxidos, defeitos e outras características intrínsecas ao processo de aspersão térmica.

Após todas essas etapas, os revestimentos foram observados no microscópio óptico da OLYMPUS, modelo BX60MF. A Figura III.13 mostra o microscópio óptico utilizado para avaliação microestrutural.



Figura III.13: Microscópio ótico utilizado para avaliação microestrutural.
Fonte: Acervo do próprio próprio autor.

III.3.3. Avaliação de porosidade

A análise de porosidade dos seis tipos de revestimentos foi realizada com auxílio do microscópio ótico OLYMPUS BX60MF, apresentado na Figura III.14. Com o auxílio do analisador de imagens Materials Extensions, foram realizadas análises quanto ao percentual de porosidade do revestimento das amostras embutidas.

A ferramenta computacional Materials Extensions, dentre outras funções, analisa pontos porosos previamente selecionados, fornecendo como resultado o percentual de área porosa do revestimento.



Figura III.14: Ilustação do Microscópio ótico e do monitor apresentando o resultado da caracterização de uma amostra [48].

III.3.4. Microscopia Eletrônica de Varredura

A análise microestrutural do revestimento e da liga intermediária foi realizada analisando os elementos liga presentes, via análise EDS (Energy Dispersive Spectroscopy), por intermédio do microscópio eletrônico de varredura do Laboratório de Materiais do CEFET/RJ. A Figura III.15 apresenta o microscópio utilizado, modelo 688A-1S – Cambridge 20 kV.



Figura III.15: Microscópio Eletrônico de Varredura utilizado.
Fonte: Acervo do próprio próprio autor.

Essa primeira análise no MEV tem como objetivo observar as diferentes características microscópicas de cada material, podendo assim observar porosidades e defeitos decorrentes do processo de metalização. O recurso de EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*) é utilizado para obter as espectografias dos elementos de liga presentes. Este dispositivo permite ainda a identificação e o mapeamento da distribuição dos elementos químicos. Foram usadas técnicas de EDS através de analise pontual e de linha.

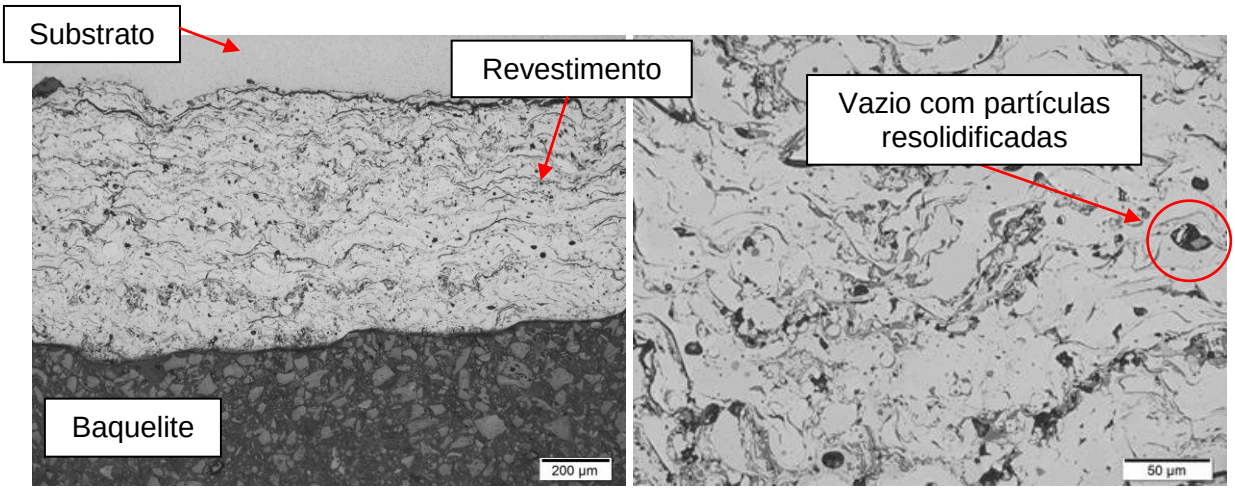
Capítulo IV – Resultados e Discussões

Neste capítulo será apresentado e comentado todos os resultados obtidos através da metodologia aplicada.

IV.1. Microscopia Ótica

A análise por microscopia ótica possibilitou o estudo das seis condições de revestimento. A seguir observa-se uma sequência de micrografias obtidas das amostras (Figura IV.1 a IV.6). Para cada microscopia, pode-se considerar que a parte mais escura é o baquelite, a parte mais clara é o substrato do material, a parte intermediária entre o baquelite e o substrato é o revestimento a ser estudado. A camada de liga intermediária, interface entre o substrato e o revestimento, apenas é observada nas micrografias obtidas pelo MEV.

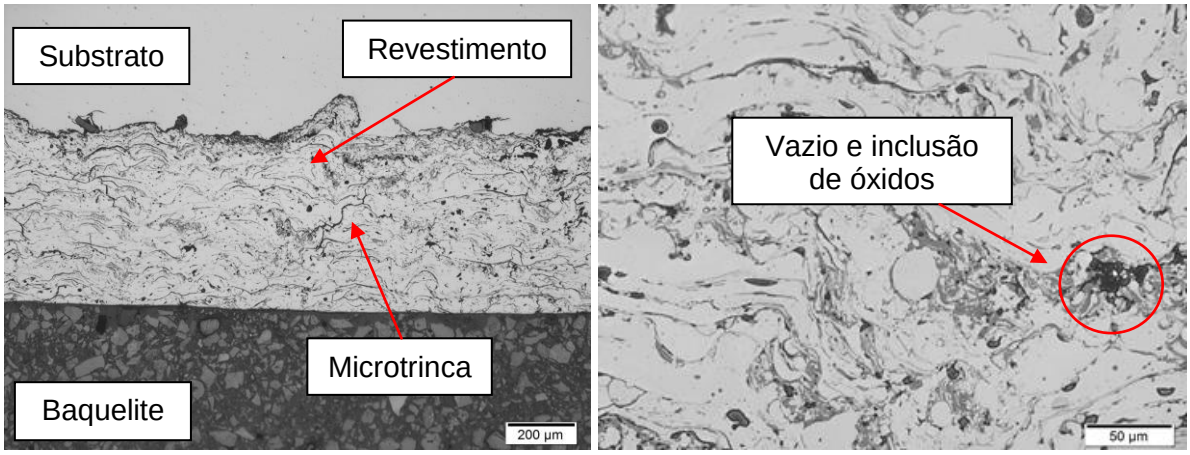
Condição 1: Amostra plana com revestimento a base de Co sem epóxi



(a) Amostra: Aumento de 100x (b) Revestimento: Aumento de 500x

Figura IV.1: Micrografias da condição 1 após metalização.

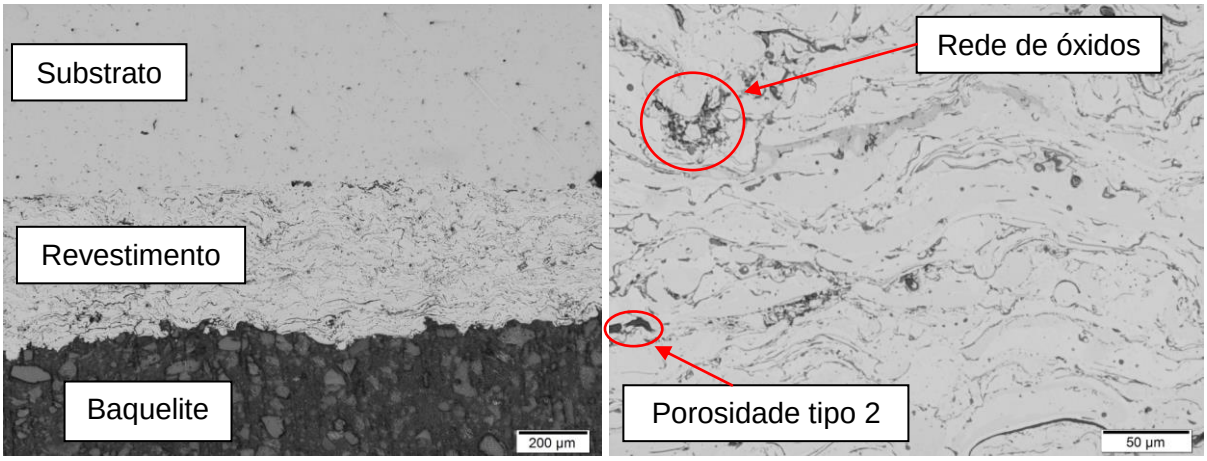
Condição 2: Amostra plana com revestimento a base de Ni e Cr sem epóxi



(a) Amostra: Aumento de 100x (b) Revestimento: Aumento de 500x

Figura IV.2: Micrografias da condição 2 após metalização.

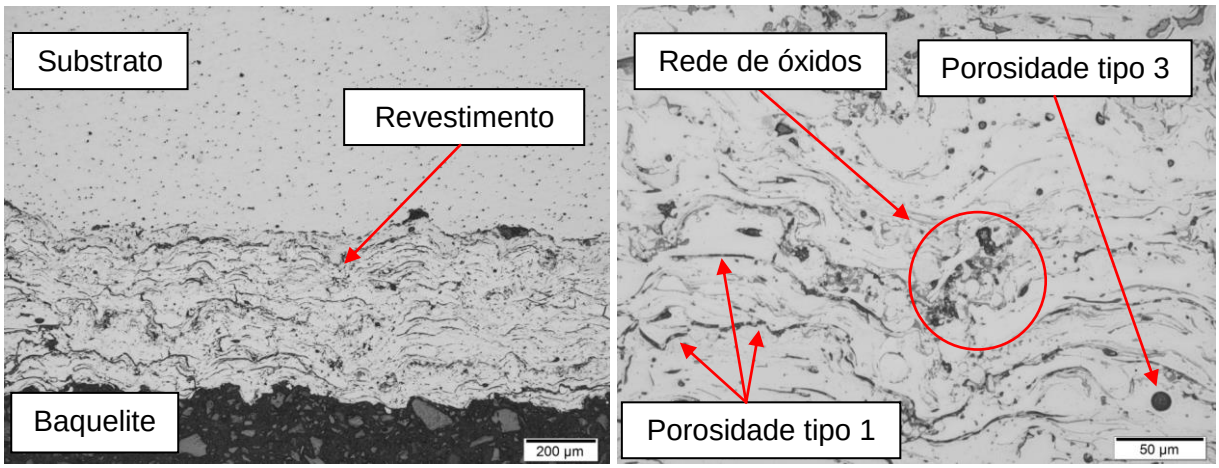
Condição 3: Amostra tubular com revestimento a base de Co sem epóxi



(a) Amostra: Aumento de 100x (b) Revestimento: Aumento de 500x

Figura IV.3: Micrografias da condição 3 após metalização.

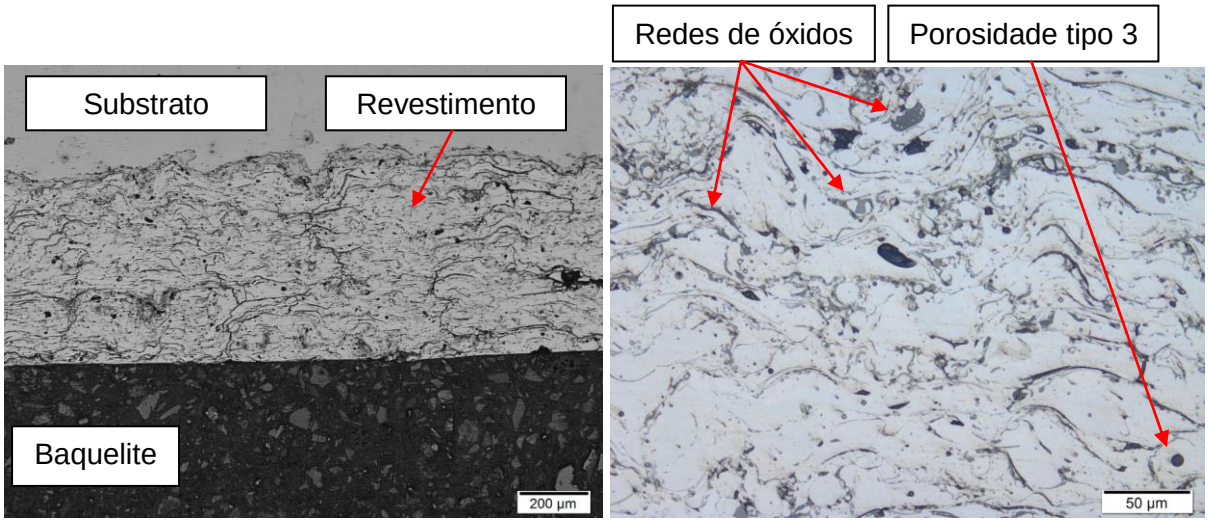
Condição 4: Amostra tubular com revestimento a base de Ni e Cr sem epóxi



(a) Amostra: Aumento de 100x (b) Revestimento: Aumento de 500x

Figura IV.4: Micrografias da condição 4 após metalização.

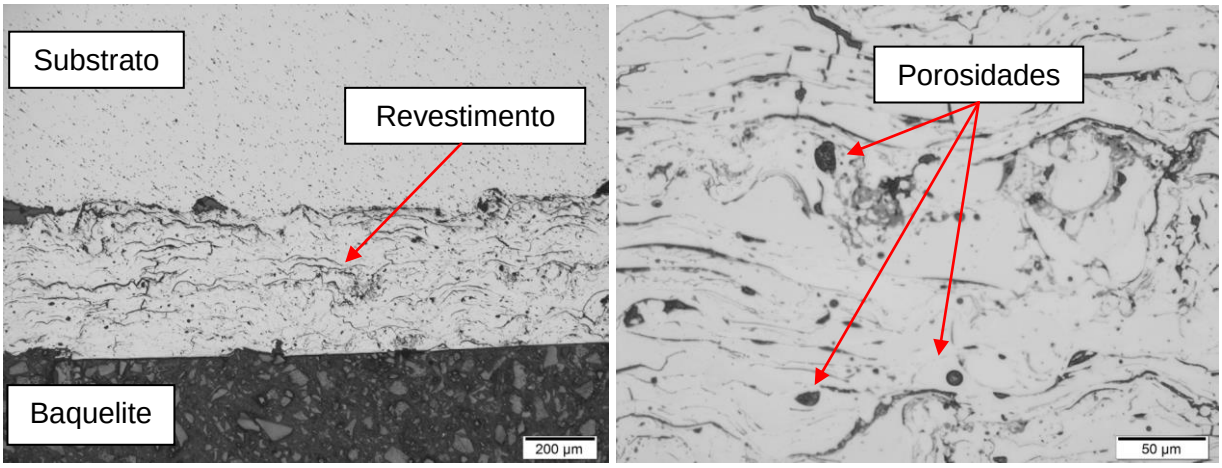
Condição 5: Amostra tubular retificada, com aplicação de epóxi antes da retífica, com revestimento a base de Co



(a) Amostra: Aumento de 100x (b) Revestimento: Aumento de 500x

Figura IV.5: Micrografias da condição 5 após metalização.

Condição 6: Amostra tubular retificada, com aplicação de epóxi antes da retífica, com revestimento a base de Ni e Cr



(a) Amostra: Aumento de 100x (b) Revestimento: Aumento de 500x

Figura IV.6: Micrografias da condição 6 após metalização.

A partir das análises realizadas nas amostras de microscopia ótica, foram identificadas lamelas regulares empilhadas em camadas tipo panqueca, homegêneas e espessas, formadas de partículas que comportam, em seu contorno, finas películas acinzentadas, possivelmente constituídas por óxidos. As superfícies mais escuras das micrografias são vazios e as superfícies acinzentadas são óxidos formados pelo contato com o oxigênio do ar comprimido, tais como óxidos de cromo, silício e manganês [49].

Com base nos estudos de Vreijling [42], é possível observar porosidades de todos os tipos, em todas as amostras. A análise de porosidade a partir das amostras de microscopia ótica, indiferem de acabamento superficial e da presença de selante superficial. A geometria do substrato influencia na presença de porosidade. As amostras cilindricas apresentaram maior concentração de poros resultantes da velocidade tangencial das partículas, prejudicando o empilhamento das lamelas. A microscopia referente a condição 1 apresenta maior quantidade de porosidade tipo 7, provavelmente formado pelas contrações de solidificação, alta quantidade de micro-trincas e partículas seminfundidas. A microscopia referente a condição 2 apresenta maior quantidade de porosidades em formato esférico, resultante de acúmulo de bolhas de gás após o resfriamento do metal, característica de porosidade tipo 3.

Berndt *et al.* [4] observaram que revestimentos aspergidos pela técnica de arco elétrico possuem lamelas mais espessas, de vários tamanhos e com maior quantidade de óxidos do que os revestimentos aspergidos por outros processos, apresentando também em sua microestrutura, partículas ressolidificadas antes do impacto, estando de acordo com as micrografias obtidas neste trabalho. A microestrutura pode ser melhorada pelo uso de menores

taxas de alimentação, arames de menores diâmetros, gases atomização inertes, redução da distância de aspersão e pela redução da voltagem do arco [4].

As características dos seis revestimentos apresentados neste trabalho, com relação a certos aspectos, se encontram de acordo com os resultados das aplicações por arco elétrico em outros trabalhos [7] [8] [16] [49], onde os depósitos produzidos apresentam estruturas lamelares espessas, com inclusões de óxidos em seus contornos, partículas não-fundidas. Além disso, concentrações de porosidade e de óxidos também se encaixam dentro das faixas estabelecidas na literatura [4] [14] [18].

As condições onde foram utilizados corpos de prova com chapa mostraram revestimentos mais uniformes e com menor variação de espessura. As condições 3 e 4, onde foram usados tubos, mostraram um revestimento irregular devido a velocidade de rotação das castanhas do torno e pela superfície circular do material que dificulta a deposição.

Em relação as amostras retificadas não houve descolamento na superfície do revestimento, devido a ação da ferramenta de corte. A espessura final após o processo de usinagem foi satisfatória e preservou a função de proteger o substrato.

IV.2 Análise de Porosidade

A análise de porosidade foi realizada nas seis amostras, pela ferramenta computacional Materials Extensions, que é um analisador de imagens obtidas pelo microscópio ótico. Na Figura IV.7 observa-se a tela da ferramenta computacional, e a faixa de pontos selecionáveis para a análise. Estimou-se um total de quatrocentos pontos igualmente distribuídos na superífice da imagem obtida pelo microscópio ótico. Para o estudo, os quadrados de coloração azulada devem contemplar em seu interior poros, de geometria circular, e apenas nessas ocasiões, devem ser selecionados.

Vreijling [42] elaborou um critério de categorização de porosidade, sendo essencial para o estudo aqui apresentado. Para a avaliação mais acertiva de porosidade é necessário a utilização de alguma metodologia que auxilie na distinção dos poros existentes nos revestimentos. Apenas foram contabilizadas as porosidades de formação aproximadamente circular.

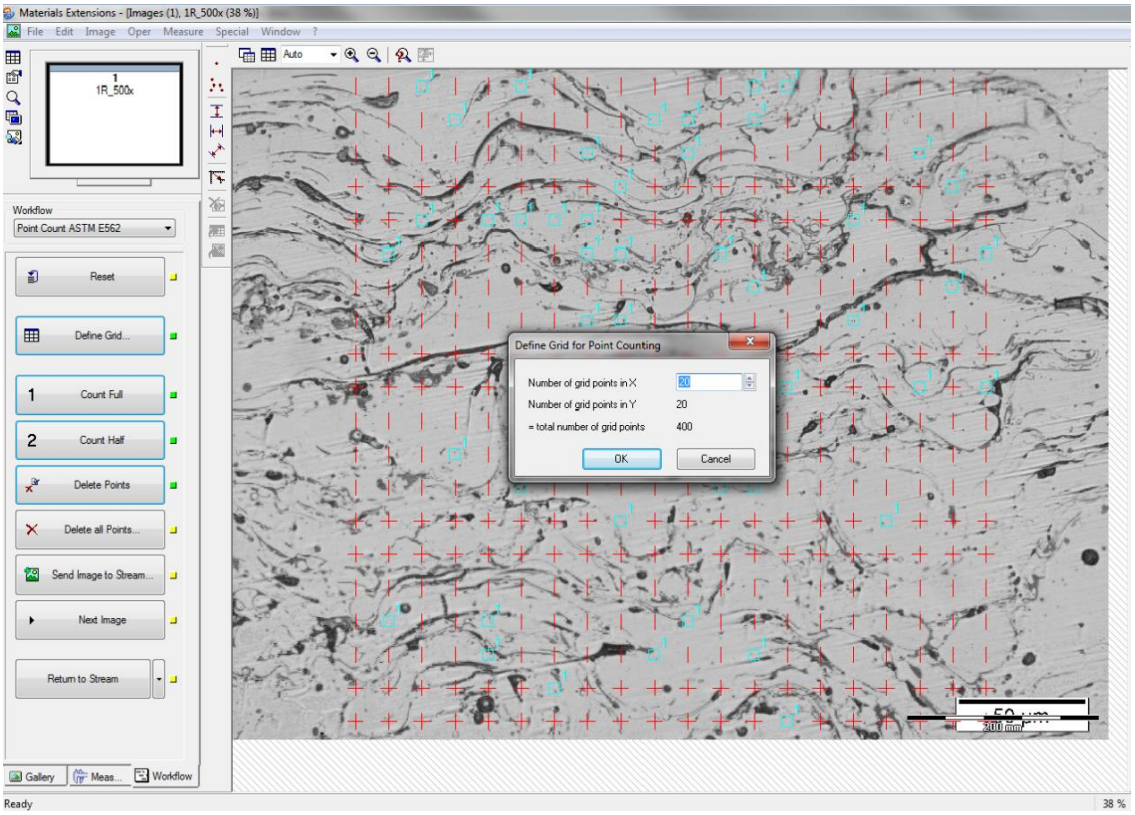


Figura IV.7: Ferramentas e parâmetros utilizados para avaliação de porosidade.

Como resultado da análise realizada pela ferramenta computacional, ele fornece o percentual de área de porosidade encontrado nas amostras, obtidas a partir da imagem obtida pelo microscópio ótico. Os resultados são fornecidos em percentuais de área, já que o microscópio ótico não fornece análise tridimensional. A utilização do microscópio eletrônico de varredura (MEV) forneceria o percentual de volume de porosidade, apurando de forma mais realística a quantificação de porosidade.

A Tabela IV.1 fornece o percentual de porosidade encontrado nas microscopias óticas das amostras, pelo programa Materials Extensions.

Tabela IV.1: Percentual de porosidade em cada condição.

Condição	Área com porosidade (%)
1	8,25
2	9,75
3	9,5
4	7,25
5	12,5
6	10,5

Os valores percentuais de porosidade se encontram dentro dos limites estabelecidos nas principais referências bibliográficas vinculadas ao tema, entre 2 a 10% [4] [14]. Lembrando que alguns parâmetros de aspersão térmica podem influenciar na qualidade do revestimento conforme é mencionado por alguns autores [4] [11] [14] [18]. A rugosidade do substrato, limpeza superficial, distância entre a pistola e o substrato, ângulo de aspersão, espessura do revestimento, velocidade da partícula, ângulo de projeção, temperatura do substrato, entre outros parâmetros, podem ser benéficos ou não a qualidade do revestimento.

Provavelmente devido as condições de aspersão, a ocorrência de porosidade foi relativamente alta, atingindo o máximo de 12,5% na condição 5 (Fe-Co-Cr-W) e o mínimo de 7,25% na condição 4 (Fe-Cr-Ni-B). Apenas as condições 5 e 6 apresentaram porosidades acima das referências bibliográficas referentes ao tema [4] [11] [12]. Para o restante das amostras atingiu-se valores de porosidade abaixo dos informados nas mesmas referências.

O silício, encontrado em baixas concentrações nas condições 2, 4 e 6, proporciona a redução da contração durante a solidificação, reduz a porosidade nas peças fundidas, além de reduzir o coeficiente de expansão térmica [65]. Esses características favoreceram baixas concentrações de poros para essas condições.

A dissipação da temperatura ao longo da seção transversal do material é afetada pela presença de porosidade e óxidos presentes na microestrutura. Semelhante às propriedades térmicas, a correlação entre a porosidade e teor de óxido não é simples. Autores demonstraram que em tais materiais anisotrópicos, o volume destas características tem uma influência menor, enquanto seu tamanho, forma, e distribuição são de crucial importância [50].

Kavka *et al.* [51] coletaram informações quanto a certas propriedades de diferentes processos de aspersão térmica. Informações como porosidade, módulo de elasticidade e microdureza foram inseridas em formato de tabela. Estas informações se encontram na tabela IV.2. Menores valores de porosidade no revestimento são encontrados a partir dos métodos de HVOF e APS.

Tabela IV.2: Percentual de porosidade em cada condição [51].

Processo	Microdureza (HV)	Porosidade		Oxigênio (ppm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
		IA (%)	AM (%)		
PTA	-	-	7 - 8	-	72
APS	-	-	5 - 7	-	63
HVOF 1	-	-	2 - 3	-	66
HVOF 2	-	4,3	-	0,36	65
HVOF 3	125	-	-	0,9	-
HVOF 4	138	-	6,8	6,1	-
MPS	126 - 165	-	-	1,7 - 2,2	-
ASP 1	153	-	8,4	6,4	-
ASP 2	90	-	-	1,5	-
CS	150	-	-	0,04 - 0,09	-
WSP	-	2	-	3 - 4,4	31
HWSP	-	1,5 - 4,9	4,7 - 13,3	1,25 - 3,38	47 - 101

Deshpande *et al.* [52] realizaram análise de porosidade pelo método de análise de imagens, conforme o trabalho aqui apresentado. Adicionalmente, também classificaram os tipos de poros em: Poros globulares e Redes de fissuras. Os poros globulares representam poros de diâmetros de 3 a 10 µm, causados pelo preenchimento incompleto de interstícios entre partículas em choque com camadas do revestimento previamente depositado, ocorrendo normalmente em casos onde existem partículas não fundidas no material aspergido. As Rede de fissuras representam conjuntos de fissuras com 0,1 a 3 µm de comprimento e 0,01 a 0,5 µm de largura, resultantes do efeito de choque térmico originado pelo resfriamento das gotículas que entram em contato com o substrato.

Terres [26] realizou análise de porosidade em oito amostras distintas. Essas amostras possuem particularidades com relação aos parâmetros de aspersão térmica. O planejamento dos experimentos, foi realizado baseado nos Métodos de Taguchi. Optou-se pela matriz de sete parâmetros a serem investigados com dois níveis cada, apresentados na Tabela IV.3. Apenas oito amostras foram preparadas para análise.

Tabela IV.3: Parâmetros investigados no estudo de Terres [26].

Parâmetro	Unidade	Influência	Proporcionalidade Parâmetro x Porosidade
Corrente	A	Média	Diretamente proporcional
Voltagem	V	Grande	Inversamente proporcional
Espessura de revestimento	µm	Grande	Inversamente proporcional
Pressão do gás atomizante	psi	Média	Inversamente proporcional
Estado do abrasivo	Nunca utilizado – Novo Utilizado mais de 10 min. - Usado	Nula	Nula
Pré Aquecimento	°C	Baixa	Diretamente proporcional
Distância de projeção	mm	Média	Diretamente proporcional

Rezaey *et al.* [53] realizaram análises de porosidade em três amostras de AISI 304 aspergidas por arco elétrico. As amostras se diferenciam com relação as outras em função da distância de aspersão, temperatura e velocidade de projeção, conforme Tabela IV.4. A amostra 2 apresentou menor incidências de porosidade, seu processo de aspersão térmica foi realizado a uma distância 150 mm entre a tocha de aspersão e o substrato, com velocidade de aspersão de 140 ± 30 m/s. Entretanto, possui maior incidência de óxidos que a amostra aspergida na distância de 100 mm com velocidade de aspersão de 170 ± 40 m/s. A maior incidência de óxidos na condição 2 se dá pelo maior contato com o oxigênio do ar atmosférico, resultado de maior trajéto das partículas e menor velocidade de aspersão. O controle da temperatura e da velocidade das partículas estão diretamente relacionados ao mecanismo de impacto e deformação da lamela quando atinge o substrato, influenciando na formação de poros [4] [8] [13] [16] [26] [33] [37] [42].

Tabela IV.4: Características e parâmetros de aspersão utilizados no estudo de [53].

Amostra	Distância de Projeção (mm)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)	Porosidade (%)	Teor de óxidos (%)
1	100	170 ± 40	2500 ± 200	4	5
2	150	140 ± 30	2500 ± 100	2	7
3	200	100 ± 20	2500 ± 100	6	8

Johnston *et al.* [54] e Tillmann *et al.* [55] realizaram estudos com relação ao comportamento das amostras com a alteração de parâmetros de aspersão térmica, principalmente: distância de aspersão, pressão dos gases de atomização principais e secundários e corrente. A faixa de porosidade encontrada por estes autores é 1 a 6%, relativamente menores que os valores encontrados neste trabalho. Autores como Sá Brito [7], Menezes [16], Marchis [56] também realizaram estudos próximos ao aqui apresentado, e

obtiveram menores valores de porosidade. Fatores como maior corrente, voltagem, velocidade de projeção, utilização de gás de projeção secundário, ângulo de projeção, metodologia de avaliação e outros, foram os principais responsáveis por esta diferença. Outros fatores que podem ter influenciado na diferença entre os resultados encontrados nestes trabalhos, e o encontrado na presente dissertação, podem ser oriundos dos critérios de contagem e dos número de pontos analisados.

IV.3. Microdureza Vickers

As amostras foram avaliadas quanto a dureza de seus revestimentos. As Figuras IV.8 a IV.20 apresentam microscopias obtidas pelo microscópio ótico, e indicadores dos valores de microdureza das duas camadas mais próximas do substrato e baquelite, onde é possível observar indentações ao longo da superfície das amostras, contemplando o revestimento, a liga intermediária e o substrato.

O ensaio de microdureza foi aplicado nas principais áreas a serem analisadas, ao longo da espessura do revestimento. Para cada amostra, foram realizados ensaios de microdureza entre três a quatro camadas do revestimento no sentido longitudinal e transversal, conforme apresentado na Figura IV.8. Para camada foram realizadas quatro medições, respeitando uma distância de cerca de 200 µm entre as indentações.

A Figura IV.8 apresenta a distribuição das indentações, que apenas foram realizadas no revestimento evitando assim medições nas superfícies da liga intermediária, baquelite e substrato. As indentações foram distribuidas em três camadas para avaliar a dureza em função da distância das camadas do revestimento ao substrato e ao baquelite.

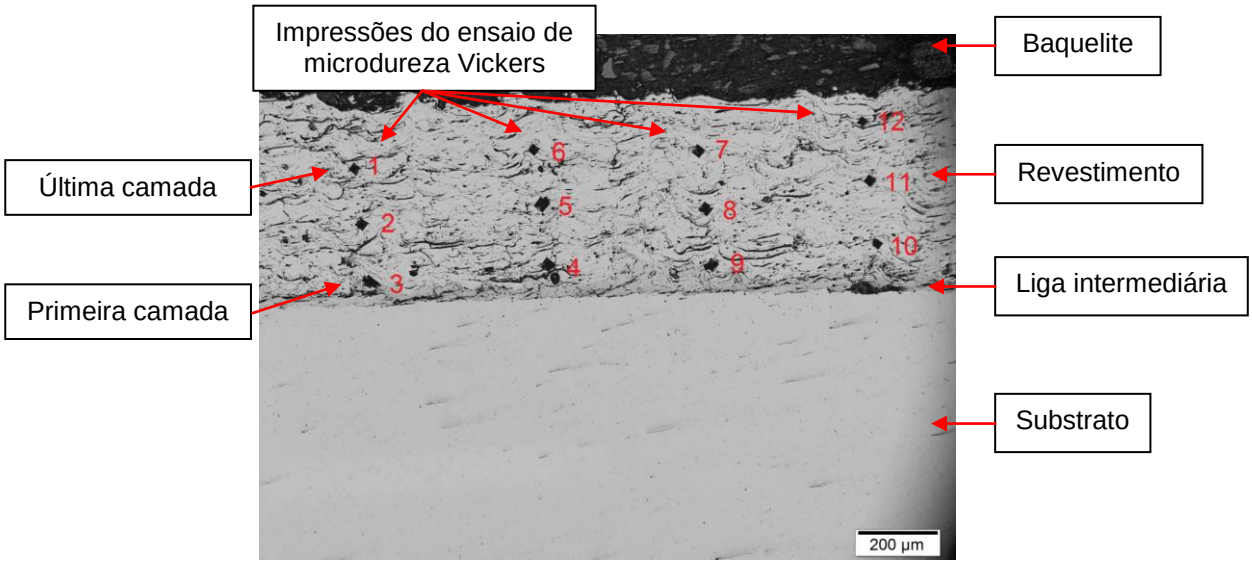
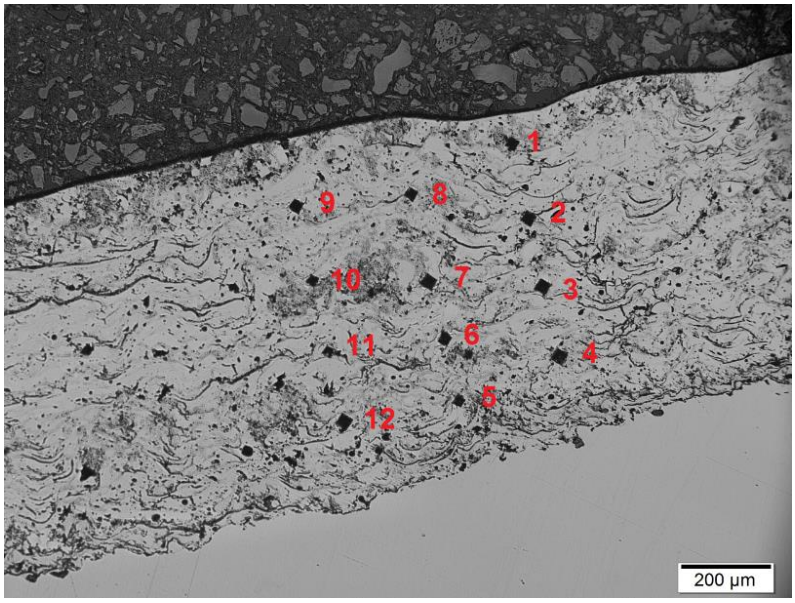


Figura IV.8: Microscopia ótica das identações realizadas para a avaliação das amostras do revestimento.

Os valores de microdureza estão apresentados em formato de gráfico, facilitando a interpretação do comportamento de microdureza (HV_{300}) nos revestimentos. Esses gráficos apresentam os valores de microdureza Vickers na camada mais próxima do baquelite (última camada) e na camada mais próxima do substrato (primeira camada). Os resultados são descriminados abaixo para cada amostra.

Condição 1: Amostra plana com revestimento a base de Co sem epóxi



Indentação	HV_{300}
1	505.6
2	394.4
3	395.2
4	414.4
5	578.9
6	536.9
7	366.5
8	595.3
9	520.4
10	669.1
11	631.5
12	448.1

Figura IV.9: Microscopia ótica das identações realizadas para a avaliação dos revestimentos com seus respectivos resultados ao lado.

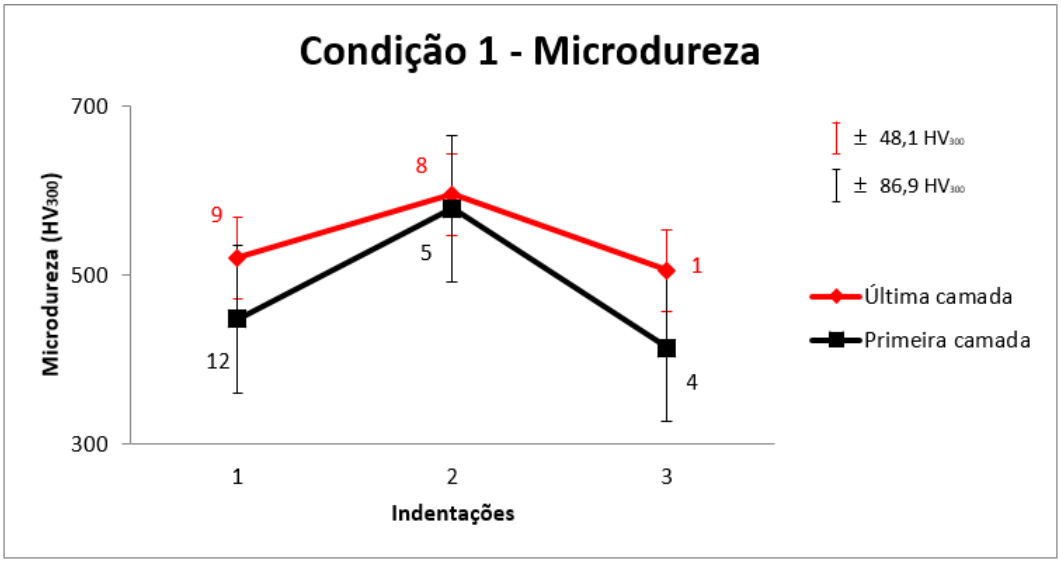
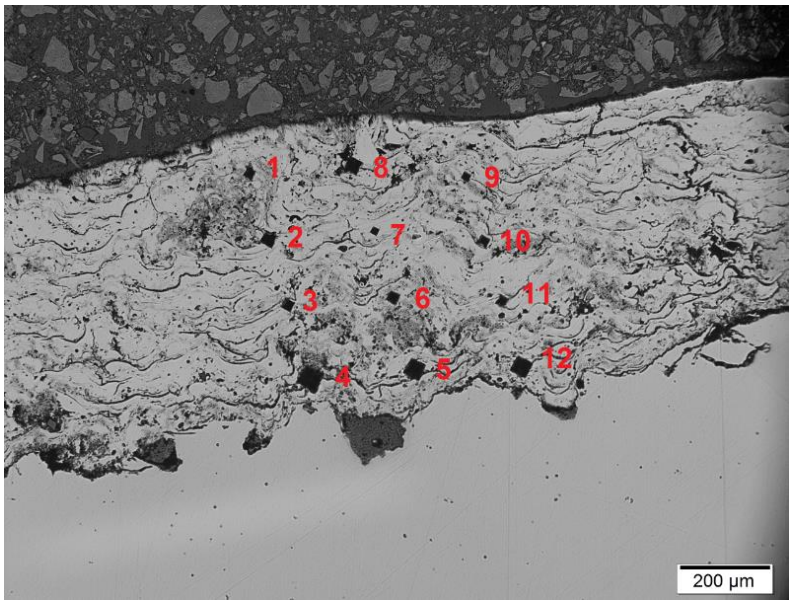


Figura IV.10: Gráfico que apresenta os resultados dos ensaios de microdureza para a primeira camada e última camada.

Condição 2: Amostra plana com revestimento a base de Ni e Cr sem epóxi



Indentação	HV_{300}
1	615.9
2	335.0
3	509.5
4	140.8
5	208.0
6	545.7
7	1029.0
8	304.0
9	931.0
10	519.5
11	552.9
12	234.7

Figura IV.11: Microscopia ótica das identações realizadas para a avaliação dos revestimentos com seus respectivos resultados ao lado.

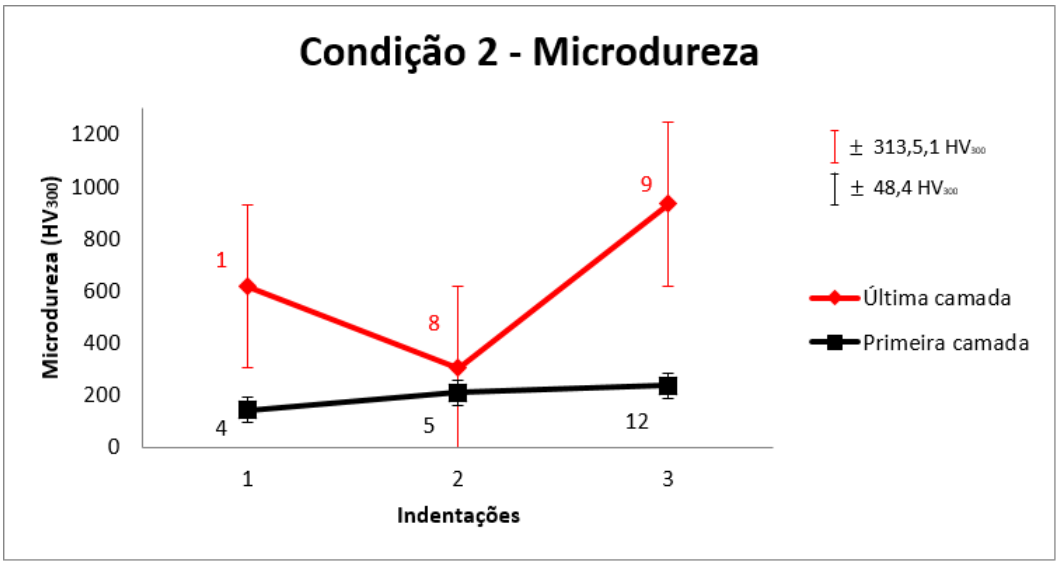
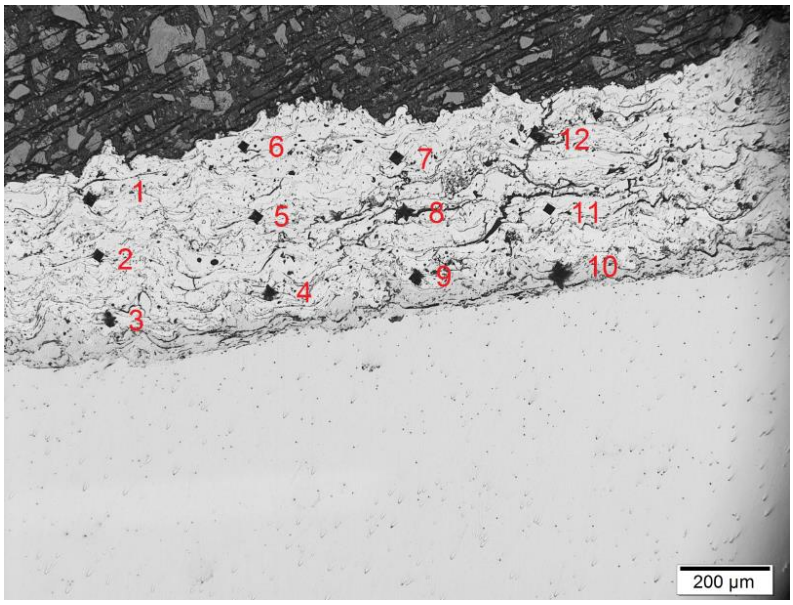


Figura IV.12: Gráfico que apresenta os resultados dos ensaios de microdureza para a primeira camada e última camada.

Condição 3: Amostra tubular com revestimento a base de Co sem epóxi



Indentação	HV_{300}
1	702.0
2	443.1
3	381.7
4	357.9
5	580.6
6	420.6
7	369.1
8	279.5
9	456.9
10	313.7
11	687.1
12	144.5

Figura IV.13: Microscopia ótica das identações realizadas para a avaliação dos revestimentos com seus respectivos resultados ao lado.

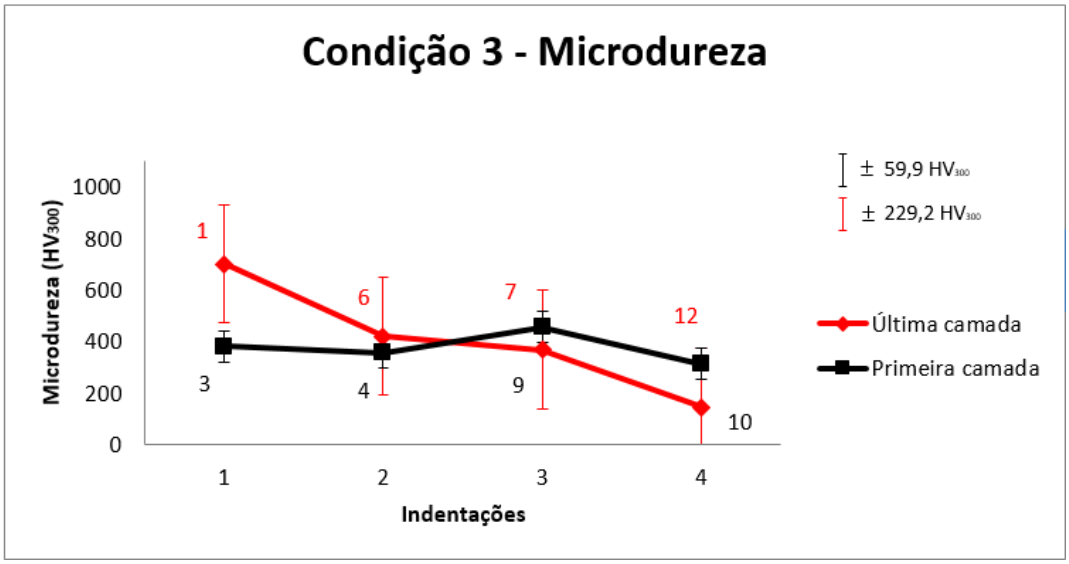
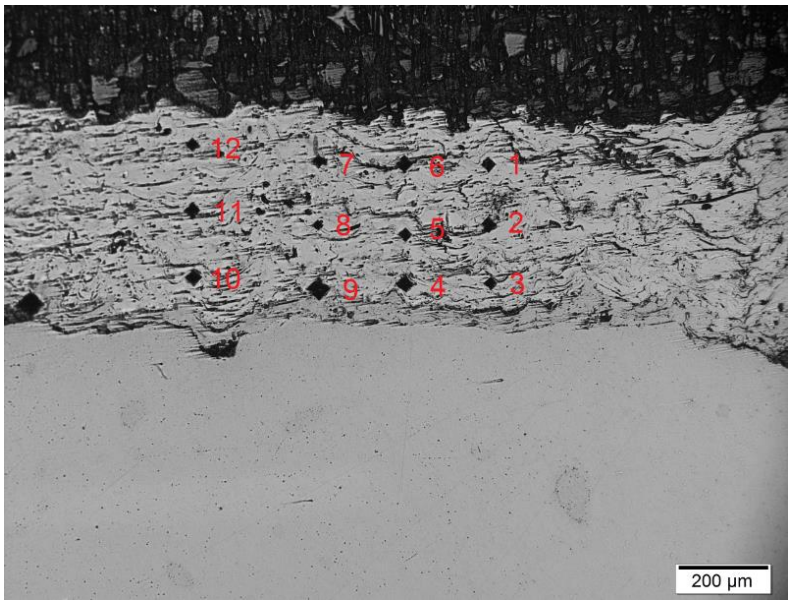


Figura IV.14: Gráfico que apresenta os resultados dos ensaios de microdureza para a primeira camada e última camada.

Condição 4: Amostra tubular com revestimento a base de Ni e Cr sem epóxi



Indentação	HV_{300}
1	508.5
2	357.2
3	356.1
4	184.1
5	686.4
6	502.0
7	328.8
8	496.5
9	315.6
10	545.8
11	390.5
12	428.8

Figura IV.15: Microscopia ótica das identações realizadas para a avaliação dos revestimentos com seus respectivos resultados ao lado.

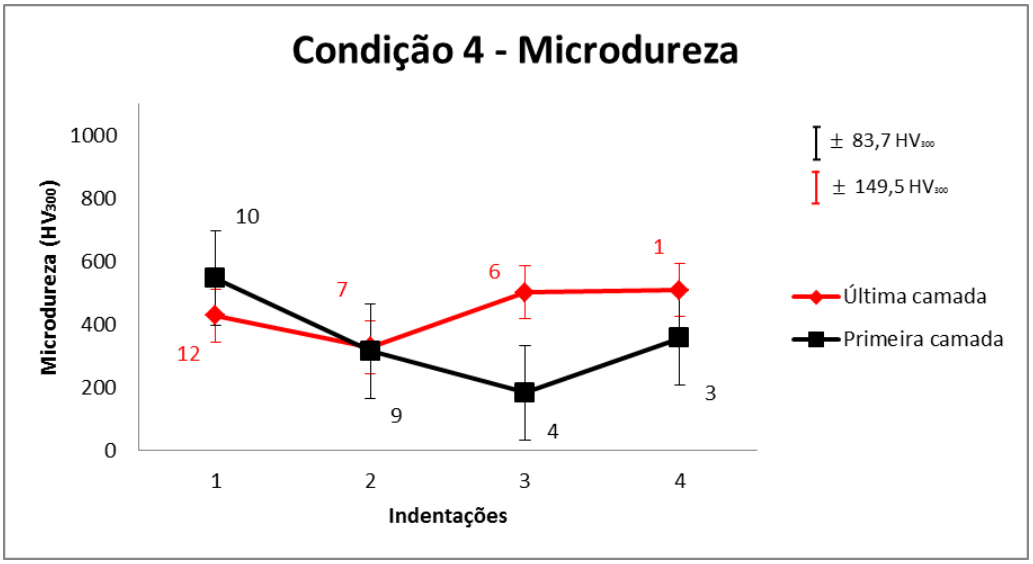
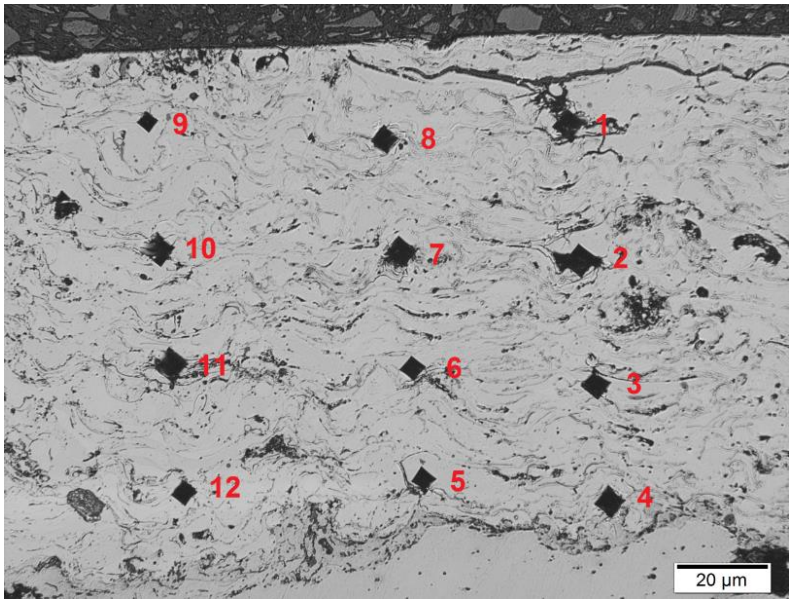


Figura IV.16: Gráfico que apresenta os resultados dos ensaios de microdureza para a primeira camada e última camada.

Condição 5: Amostra tubular retificada, com aplicação de epóxi antes da retífica, com revestimento a base de Co



Indentação	HV_{300}
1	1007.0
2	420.8
3	364.4
4	642.3
5	628.4
6	693.3
7	457.1
8	565.3
9	359.2
10	433.3
11	569.7
12	452.6

Figura IV.17: Microscopia ótica das identações realizadas para a avaliação dos revestimentos com seus respectivos resultados ao lado.

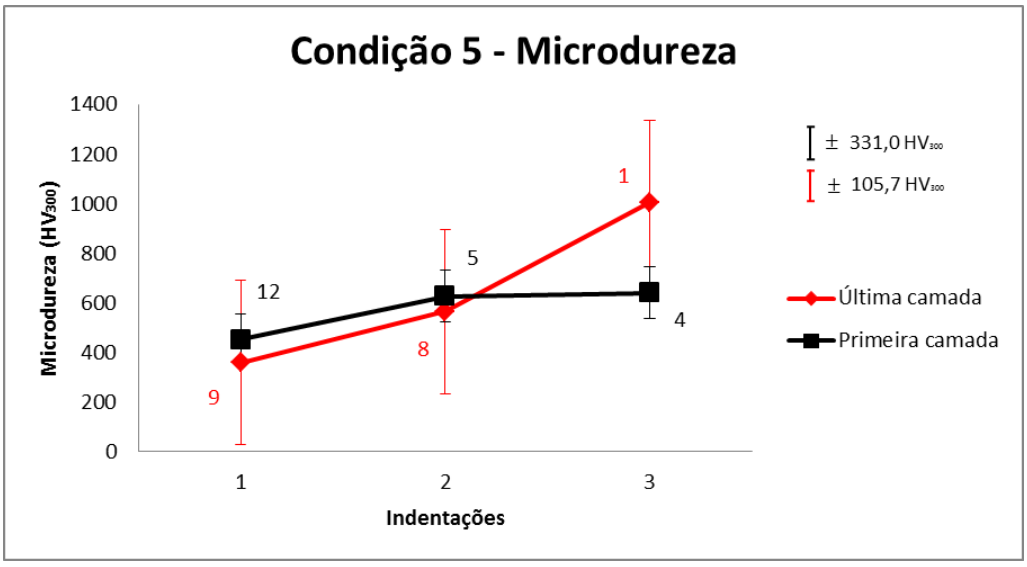
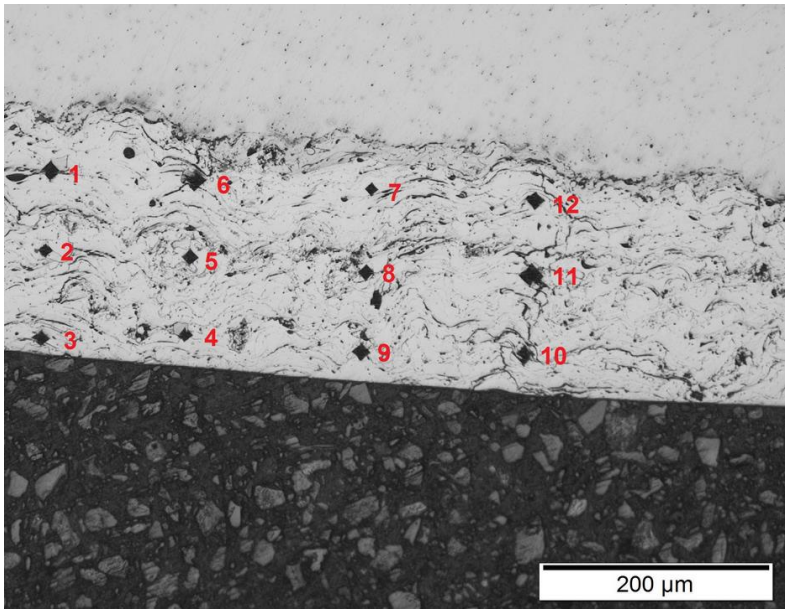


Figura IV.18: Gráfico que apresenta os resultados dos ensaios de microdureza para a primeira camada e última camada.

Condição 6: Amostra tubular retificada, com aplicação de epóxi antes da retífica, com revestimento a base de Ni e Cr



Indentação	HV_{300}
1	542.3
2	791.9
3	445.3
4	377.7
5	601.2
6	758.3
7	503.4
8	625.6
9	882.0
10	498.7
11	282.1
12	359.4

Figura IV.19: Microscopia ótica das identações realizadas para a avaliação dos revestimentos com seus respectivos resultados ao lado.

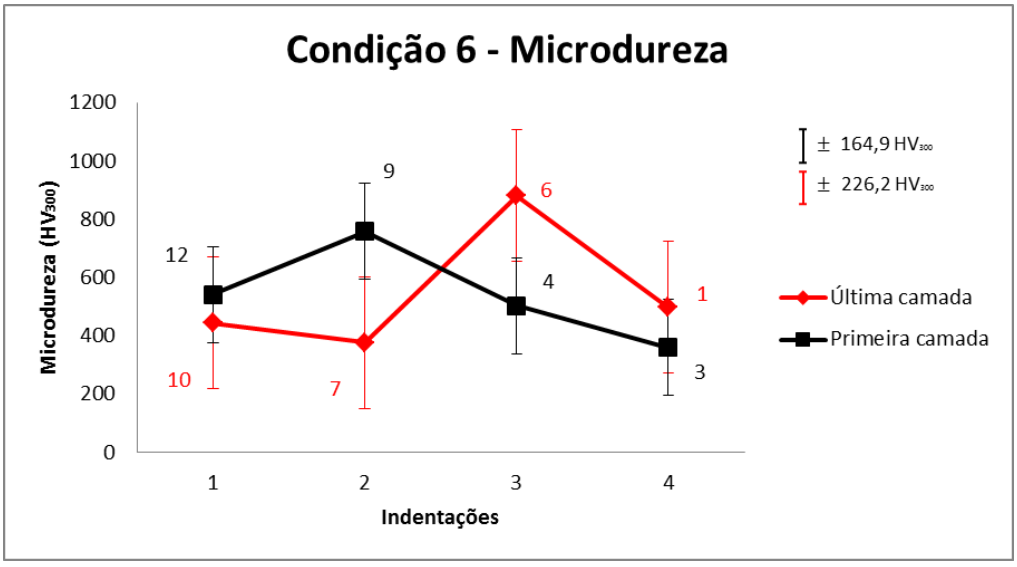


Figura IV.20: Gráfico que apresenta os resultados dos ensaios de microdureza para a primeira camada e última camada.

As Figuras IV.21 e Figuras IV.22 apresentam as médias aritméticas de microdurezas Vickers (HV_{300}) considerando todas as 12 indentações realizadas para cada amostra.

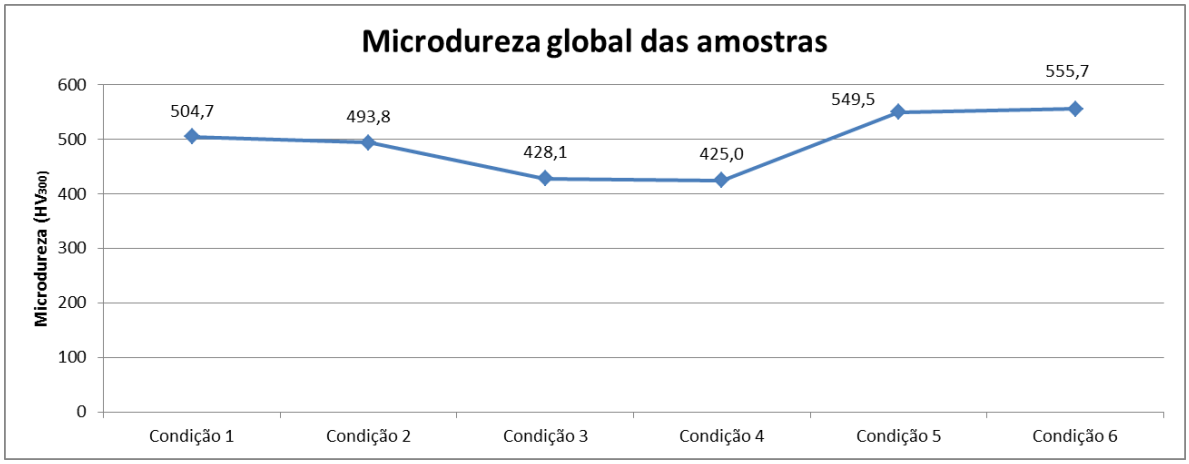


Figura IV.21: Gráfico que apresenta a média global dos valores de microdureza vickers para as condições analisadas.

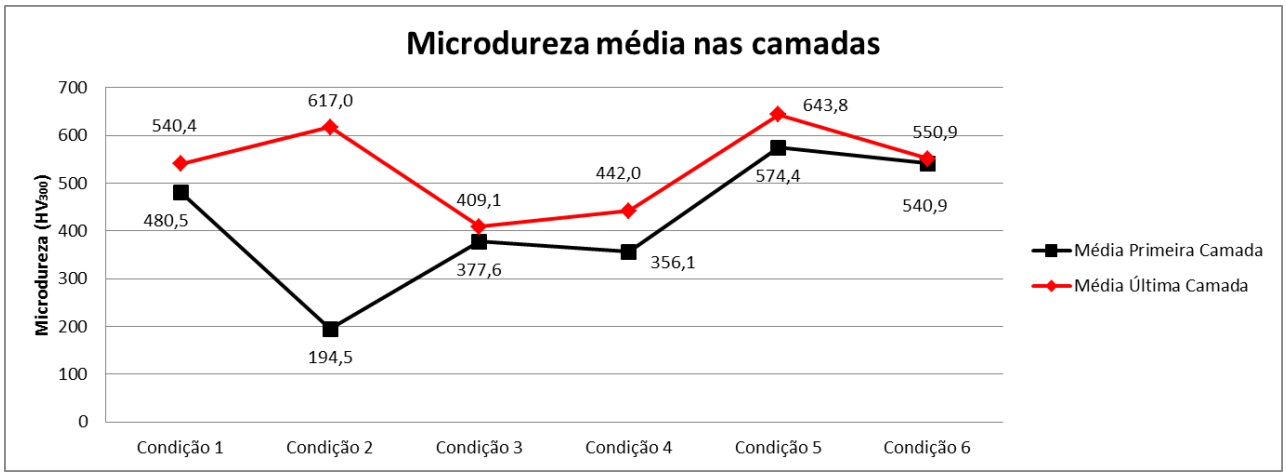


Figura IV.22: Gráfico que apresenta a média dos valores de microdureza vickers, na primeira camada e última camada para as condições analisadas.

A partir do ensaio de microdureza Vickers ao longo do revestimento, em pontos próximos tanto ao substrato como ao baquelite, observou-se picos de valores de microdureza para as condições 5 e 6. Comparativamente, os valores da média de dureza são maiores para a condição 5, devido a possíveis encruamentos superficiais ocasionados por um processo de usinagem grosseiro, ou a elevadas velocidades de corte, que fornece elevada quantidade de calor para o substrato, proporcionando mudanças microestruturais como precipitação de carbetos mais duros.

As diferenças entre os valores da média da primeira camada e média da segunda camada para a condição 2 ocorreu devido a medição de microdureza em pontos de elevada dureza na última camada, provavelmente pela presença de cabertos e precipitados.

A partir das análises de dureza realizadas no revestimento, é possível observar a diferença entre os valores de dureza do substrato e do revestimento. O valor da dureza média do substrato é de 132,8 HV_{300}, enquanto que o valor de dureza médio de todo o revestimento é de 491,2 HV_{300}. Essa comparação demonstra os benefícios adquiridos pelo processo de revestimento de materiais metálicos aspergidos termicamente em termos de dureza.

O valor médio de dureza ao longo da camada de revestimento de composição Fe – Cr – B / Co – Cr – W (Combinação 1) foi bem próximo do revestimento de composição Fe – Cr – B / Fe – Cr – Ni (Combinação 2), que obteve os maiores valores de dureza. Tassi *et al.* [57] encontraram valores de microdureza na faixa de 200 HV_{300} pelo método de microdureza Vickers em revestimentos realizados pelo método de aspersão térmica a pó de alúminio, por chama oxiacetilênica em substrato de aço inxodiável austenítico 304L. Este trabalho apresentou valores de dureza bem superiores, isso ocorre, entre outros fatores, pela presença de Fe-B e boretos e óxidos de cromo, que proporcionam benefícios com relação a dureza superfícial. O Cromo também é utilizado como refinador de grão e diminui a incidência de trincas resultantes de tensões.

Nesta dissertação, em algumas condições, foram encontrados valores elevados de dureza, na faixa de 800 a 1000 HV_{300}. Este fato se deve provavelmente a presença, nas regiões avaliadas, de carbetos ou partículas semifundidas provenientes do metal de adição. Factor e Roman [58] encontraram valores de microdureza Vickers na faixa de 1.000 a 1.200 HV_{300} para as ligas estudadas. Foi aplicado um liga de carbetos de tungstênio pelo método HVOF. Através do método EDS, observou-se que o revestimento consistia-se de partículas de WC em uma matriz amorfa de Co com presença de WC_2.

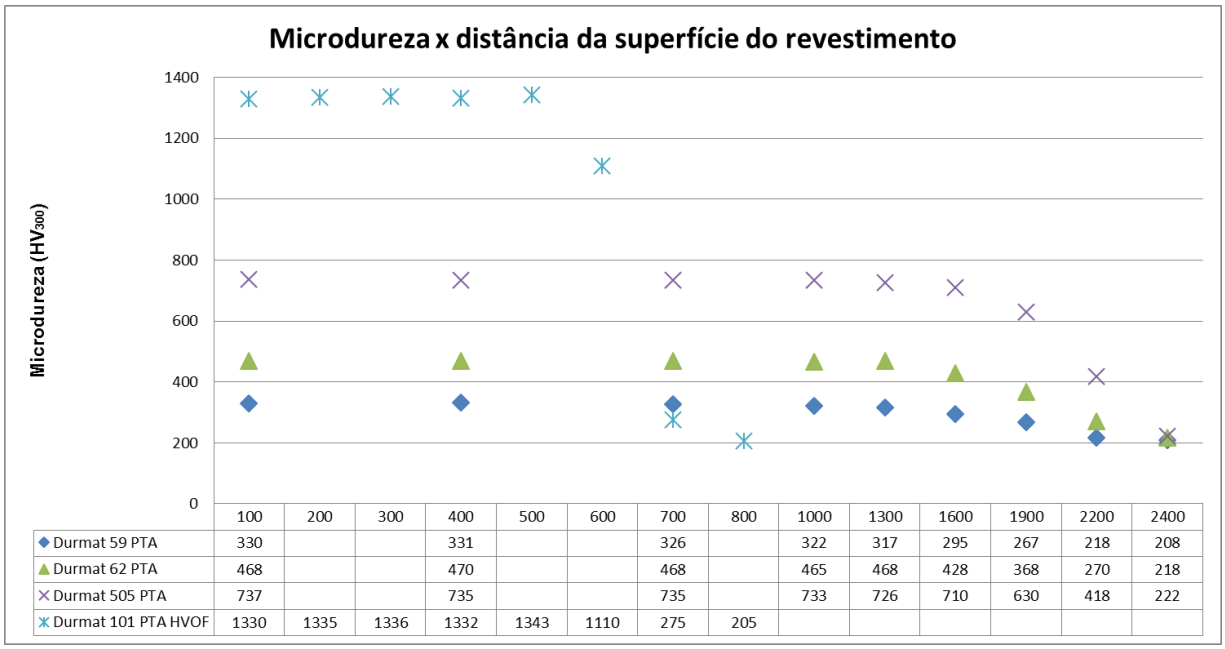
Capra [59] realizou os ensaios de microdureza Vickers com cargas de 0,3 kgf em amostras planas de substrato de aço carbono SAE 1020, aspergidas por aspersão térmica oxiacetilênica de alumínio e depois passaram por um processo de refusão. As análises foram realizadas ao longo da seção transversão do revestimento, encontrando valores na faixa de 250 a 350 HV_{300} para a seção do revestimento realizada por aspersão térmica oxiacetilênica. Os valores de dureza são maiores em regiões próximas ao substrato pela formação de Fe_3Al, e menores em regiões próximas a superfície do revestimento pela formação de FeAl.

Estudos realizados por Hearley *et al.* [60] analisam o efeito da vazão dos gases na microdureza dos revestimentos de Ni-Al. A análise foi realizada por intermédio de penetrador Vickers com carga de 0,2 kgf. Foi feita uma análise de valores de dureza em amostras realizadas pelo processo de aspersão térmica HVOF, em função da vazão de oxigênio e propileno. Houve um aumento de dureza, com o aumento da vazão de oxigênio devido a maior quantidade de óxidos distribuídos pela microestrutura, principalmente nos contornos das lamelas. Houve também uma diminuição nos valores de dureza em razão do aumento da vazão de propileno, devido a diminuição do percentual da razão estequiométrica, considerando os níveis de vazões utilizados para o propileno e oxigênio, resultando em uma menor temperatura de chama, e portanto, partículas sofrendo impacto com menos energia no substrato.

ZHAO *et al.* [61] realizaram análises de dureza em função da temperatura e velocidade das partículas aspergidas. A análise foi realizada por intermédio de penetrador Vickers com carga de 0,3 kgf, em revestimentos de WC-Co-Cr. É possível observar uma tendência com proporções lineares ascendentes entre a dureza do revestimento e os parâmetros de aspersão, temperatura e velocidade das partículas no impacto.

Almeida *et al.* [62] realizaram avaliações de microdureza com cargas de 0,3 kgf em amostras de revestimentos de aspersão térmica a PTA. Verifica-se que a diluição medida não apresentou impactos diretos na microdureza dos revestimentos, e que os depósitos apresentam perfis de dureza uniformes, comprovando sua homogeneidade, com pequenas variações entre si. Variações de 500 a 580 HV_{300} entre os depósitos são inesperados, em função da variação dos níveis de diluição, demonstrando que os perfis medidos são determinandos principalmente pela composição química da mistura de pós, que originaram a liga β-NiAl em todos os depósitos.

Contreras [63] avaliou, utilizando a técnica de microdureza Vickers, cinco diferentes tipos de revestimentos, relacionando os valores de microdureza com relação a distância da superfície do revestimento. Os valores estão apresentados no gráfico da Figura IV.23 apresentado abaixo.



	100	200	300	400	500	600	700	800	1000	1300	1600	1900	2200	2400
Durmat 59 PTA	330			331			326		322	317	295	267	218	208
Durmat 62 PTA	468			470			468		465	468	428	368	270	218
Durmat 505 PTA	737			735			735		733	726	710	630	418	222
Durmat 101 PTA HVOF	1330	1335	1336	1332	1343	1110	275	205						

Figura IV.23: Valores de microdureza em pontos em função da distância entre a superfície do revestimento [63].

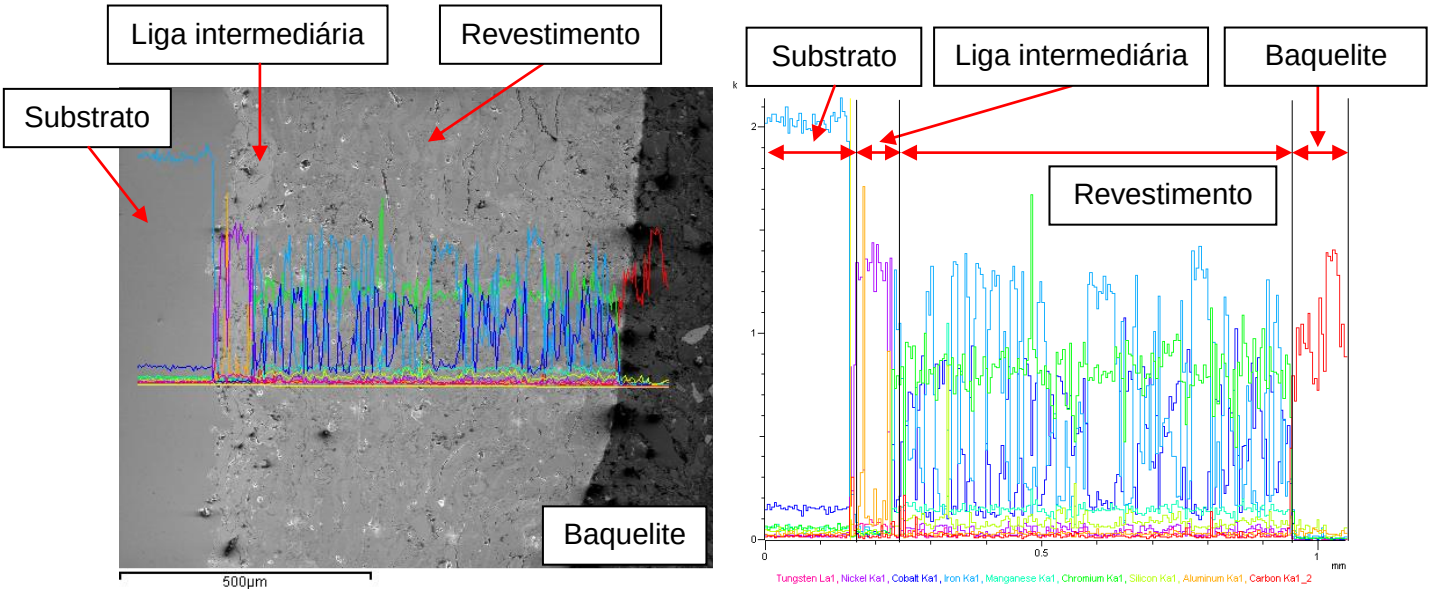
Para as amostras Durmat 59, 62 e 505 PTA observa-se que a medida que as avaliações se afastam da superfície do revestimento, a distâncias acima de 1.300 µm, ocorre um decréscimo acentuado dos valores de microdureza. Isso ocorre pois a partir desta distância, entra-se na área de interface entre o revestimento e o substrato, e devido a temperatura de aplicação da solda, a superfície do substrato, que começa a partir de 2.000 µm, adquire maiores valores de dureza, apenas chegando ao valor real do substrato, cerca de 210 HV_{300}, a partir de 2.400 µm.

Para a amostra Durmat 101 PTA HVOF é possível observar que a medida que as identações se afastam da superfície do revestimento, o valor de microdureza é quase constante. A partir dos 600 µm de distância, a microdureza cai drasticamente, pois o revestimento é bem fino, acessando assim o substrato. Isto é esperado devido à aplicação de baixa temperatura do revestimento (cerca de 100°C).

IV.4. Microscopia Eletrônica de Varredura

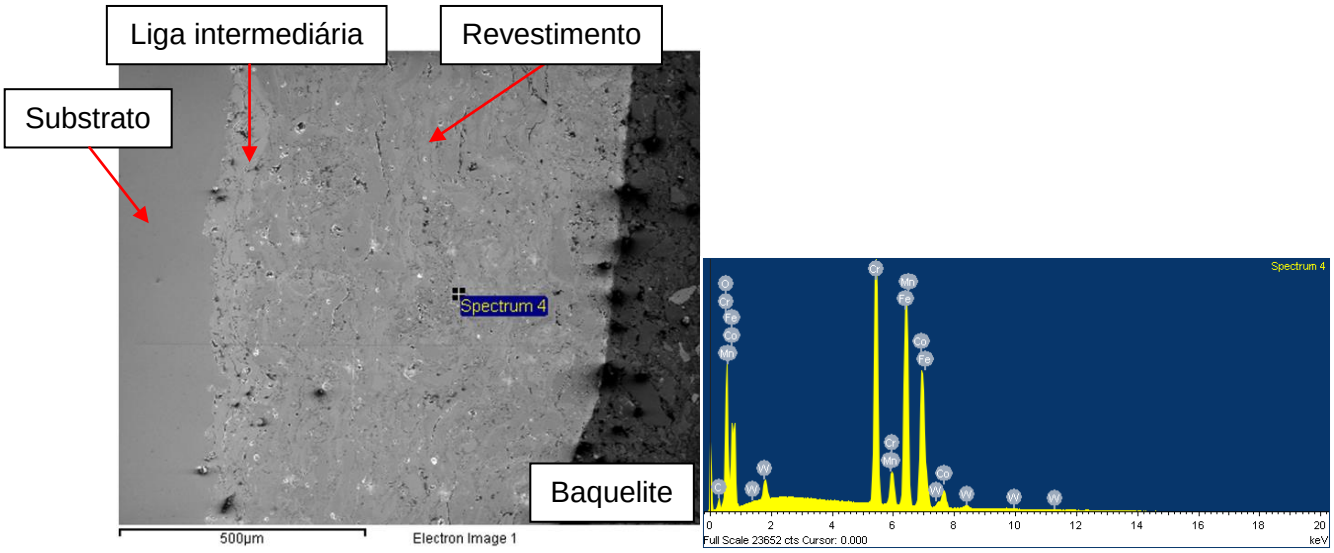
Neste item são comparadas as morfologias dos revestimentos e suas condições, observadas a partir das micrografias obtidas através do MEV. Para cada micrografia foram analisados espectros de EDS, indicando os elementos de liga presentes. As Figuras IV.24 (a) e (b) as Figuras IV.33 (a) e (b) apresentam análises de linha e de pontos, com os detalhes de óxidos e de porosidades encontrados nas diversas condições, além de apresentar em detalhes o espectro de EDS de linha para cada amostra.

Condição 1: Amostra plana com revestimento a base de Co sem epóxi



(a) (b)

Figura IV.24: (a) Morfologia da condição 1 (b) Espectro de EDS de linha para da área total.



(a) (b)

Figura IV.25: (a) Morfologia da condição (b) Espectro de EDS pontual da área 4.

A Figura IV.24 (a) apresenta a morfologia e o espectro de EDS de linha da amostra da condição 1 em uma seção que contempla o substrato, liga intermediária, revestimento e baquelite. Já a Figura IV.24 (b) apresenta em detalhe o espectro de EDS da morfologia apresentada na Figura IV.25 (a). A figura IV.25 apresenta a morfologia e o espectro de EDS pontual da amostra da condição 1 em um ponto aleatório no revestimento.

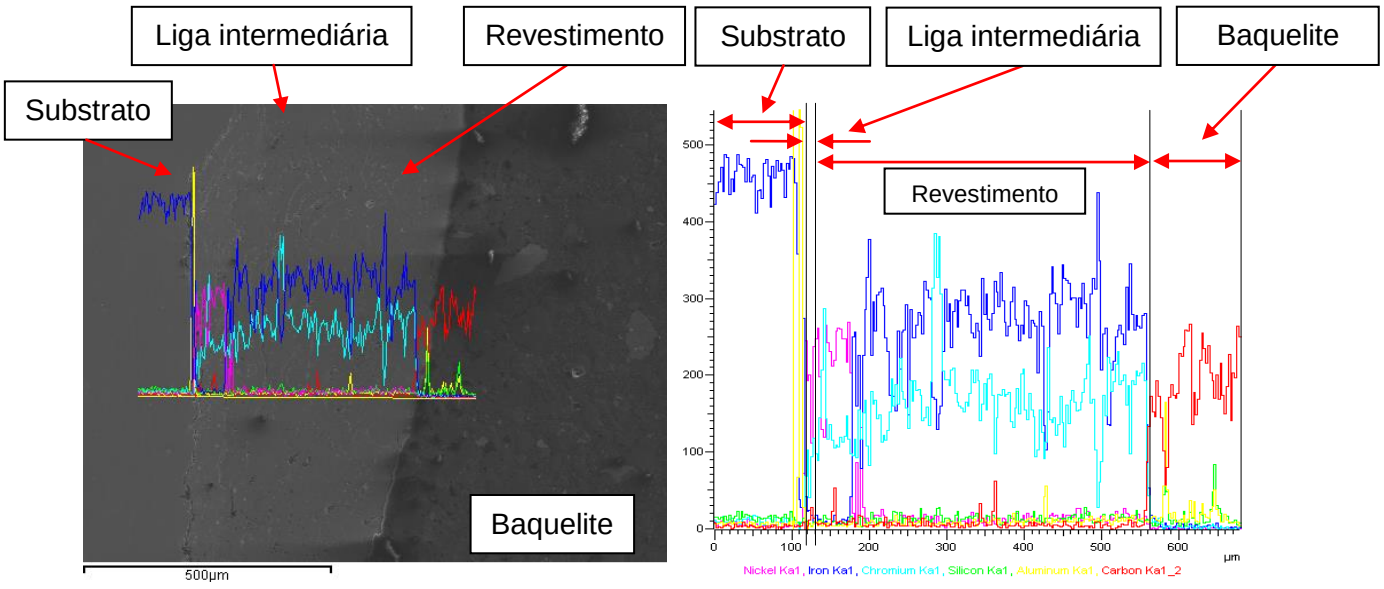
Pelas Figuras IV.24 e IV.25 é possível observar que o revestimento da condição 1 apresenta elevadas concentrações de Fe, Co, Ni e Cr; a liga intermediária possui elevadas concentrações de Ni e Al e o substrato possui composição química basicamente formada por Fe. A partir desses resultados é possível validar quallitativamente as informações fornecidas pela empresa responsável pelo processo de aspersão térmica.

Na Figura IV.25 (a), observa-se pouca densidade de microtrincas, além de lamelas uniformes. A Figura IV.25 (b) apresenta um espectro da área 4 que identifica presença de Fe, Mn, Co e Cr em hegemonia em relação aos outros elementos químicos, de acordo com a composição química dos arames utilizados na aspersão.

O níquel, em quantidades suficientes, estabiliza as estruturas austeníticas, fornecendo melhorias nas propriedades mecânicas e nos processos de fabricação. O níquel também é eficaz na promoção de passivação, especialmente em ambientes corrosivos. O níquel é particularmente útil na resistência à corrosão de ácidos minerais. Na faixa de 8 a 10% de níquel, ocorre aumento aumenta da resistência ao escoamento, dureza e resistência a corrosão [64].

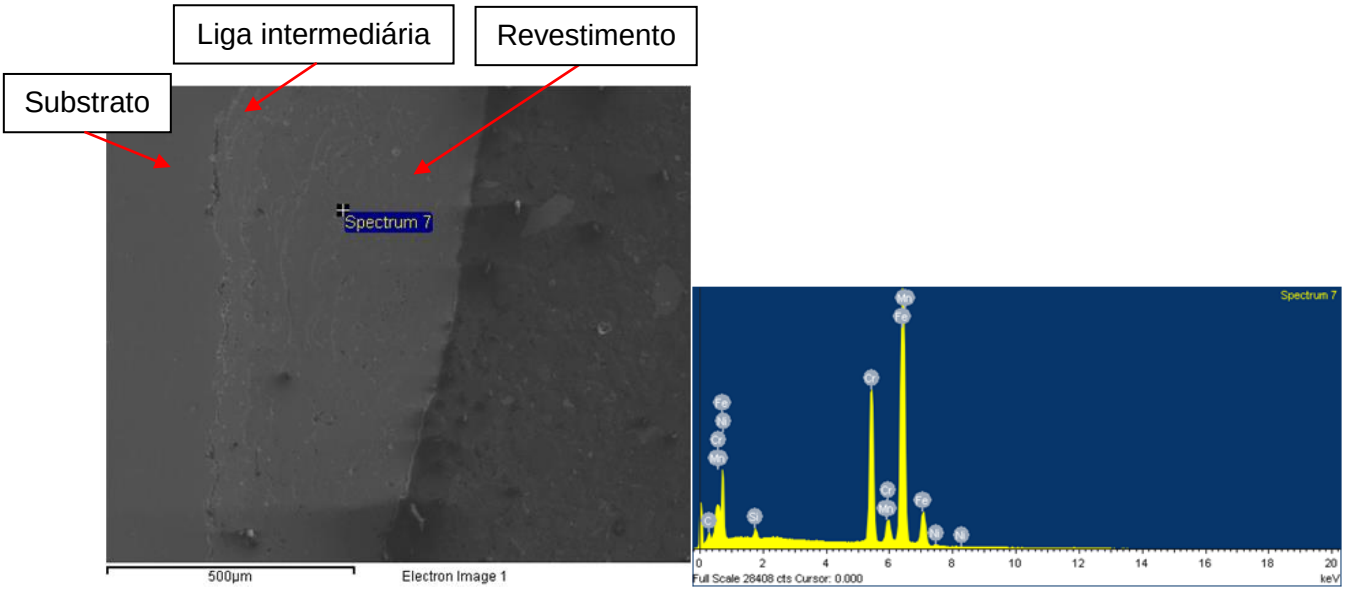
O ferro é geralmente utilizado em ligas à base de níquel para redução de custos, não para proporcionar resistência à corrosão. Contudo, o ferro fornece ao níquel maior resistência à H_2SO_4 em concentrações acima de 50%. O ferro também aumenta a solubilidade do carbono no níquel, melhorando a resistência a ambientes de alta temperatura [64].

Condição 2: Amostra plana com revestimento a base de Ni e Cr sem epóxi



(a) (b)

Figura IV.26: (a) Morfologia da condição 2 (b) Espectro de EDS de linha para da área total.



(a) (b)

Figura IV.27: (a) Morfologia da condição 2 (b) Espectro de EDS pontual da área 5.

A Figura IV.26 (a) apresenta a morfologia e o espectro de EDS de linha da amostra da condição 2 em uma seção que contempla o substrato, liga intermediária, revestimento e baquelite. Já a Figura IV.26 (b) apresenta em detalhe o espectro de EDS da morfologia apresentada na Figura IV.26 (a). A Figura IV.27 apresenta a morfologia e o espectro de EDS pontual da amostra da condição 1 em um ponto aleatório no revestimento.

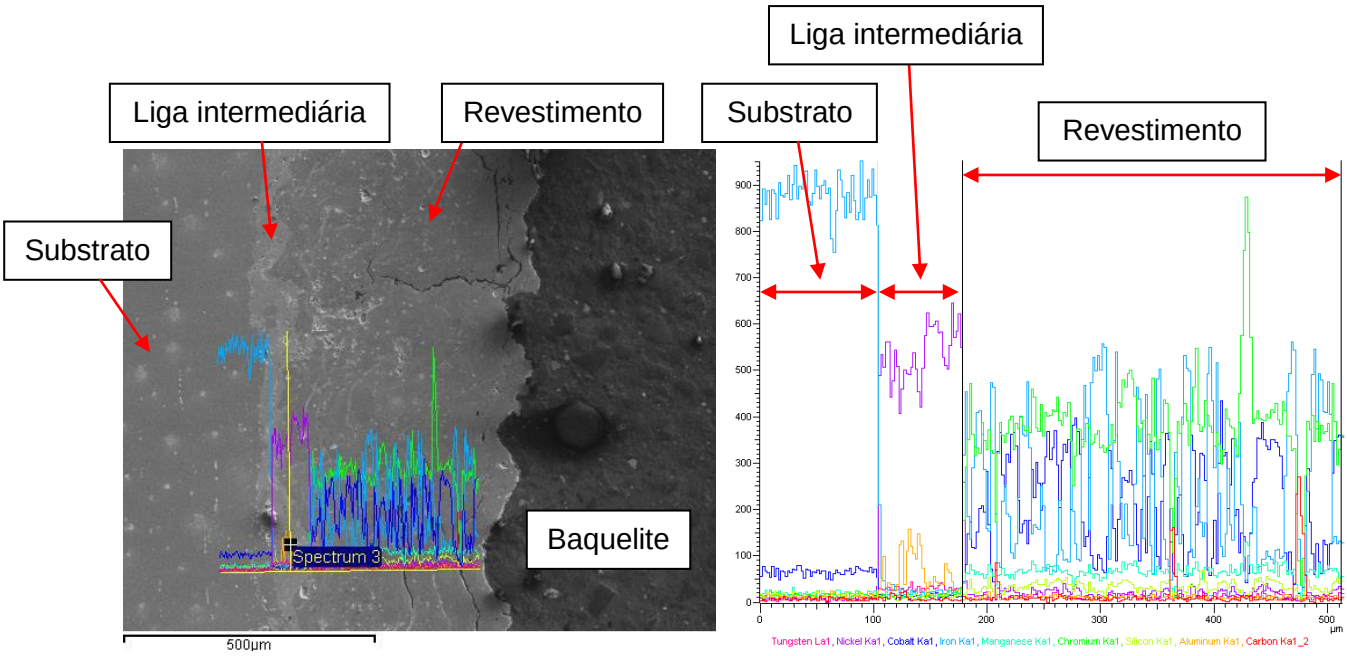
Pelas Figuras IV.26 e IV.27 é possível observar que o revestimento da condição 2 apresenta elevadas concentrações de Mn, Fe, Cr e Ni; a liga intermediária possui elevadas concentrações de Ni e Al e o substrato possui composição química majoritária basicamente formada por Fe. A partir desses resultados é possível validar qualitativamente os elementos químicos dos revestimentos estudados.

Na Figura IV.27 (a), observa-se pouca densidade de microtrincas, além de lamelas uniformes. A Figura IV.27 (b) apresenta um espectro da área 7 que identifica presença de Fe, Mn, Cr e Ni em hegemonia em relação aos outros elementos químicos, estando assim de acordo com a composição química dos arames utilizados na aspersão.

O manganês em quantidades moderadas e em associação com adições de níquel realiza muitas das funções atribuídas ao níquel, como proporcionar uma excelente resistência à corrosão. No entanto, a substituição total de níquel por manganês não é prática. Muitos aços com elevada concentração de manganês possuem algumas propriedades mecânicas incomuns e úteis, como resistência ao desgaste. O manganês interage com enxofre em aços inoxidáveis para formar sulfetos de manganês.

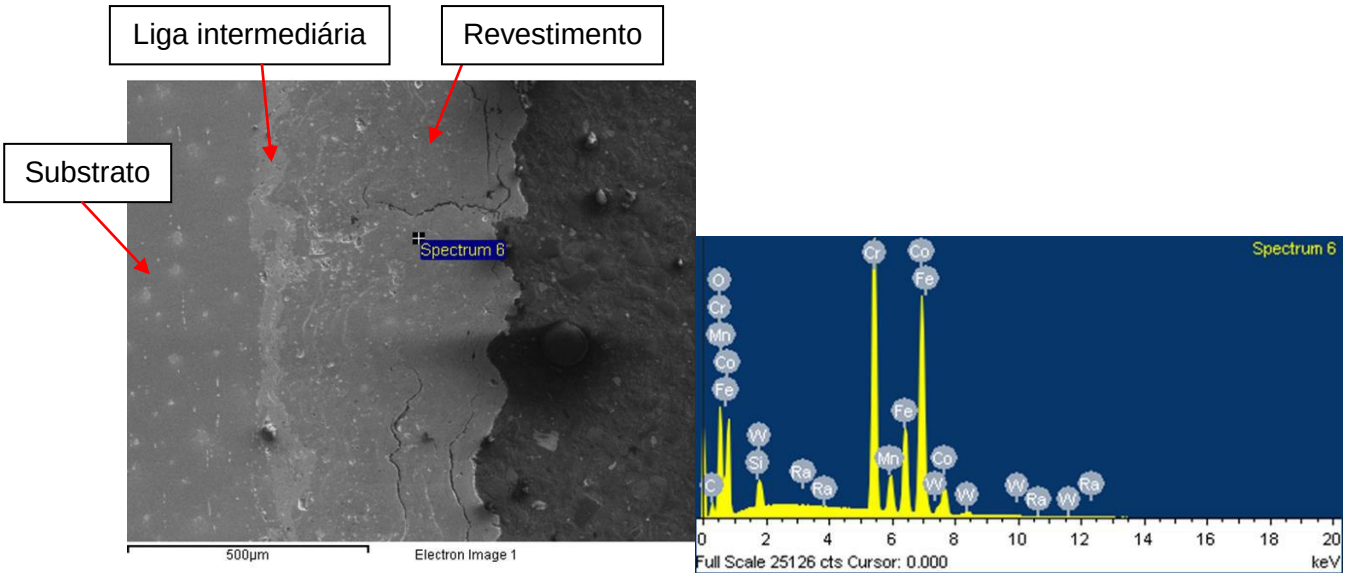
O cromo é um elemento essencial na formação da película passivadora. No entanto, maior concetração de cromo pode afetar as propriedades mecânicas, usinabilidade, soldabilidade, ou aplicações que envolvem certas exposições térmicas. Este elemento químico também é utilizado para aumentar a temperabilidade e a dureza, além de aumentar a resistência ao desgaste. Portanto, muitas vezes é mais eficiente para melhorar a resistência à corrosão por alteração de outros elementos, com ou sem aumento de cromo [64].

Condição 3: Amostra tubular com revestimento a base de Co sem epóxi



(a) (b)

Figura IV.28: (a) Morfologia da condição 3 (b) Espectro de EDS de linha para da área total.



(a) (b)

Figura IV.29: (a) Morfologia da condição 3 (b) Espectro de EDS pontual da área 6.

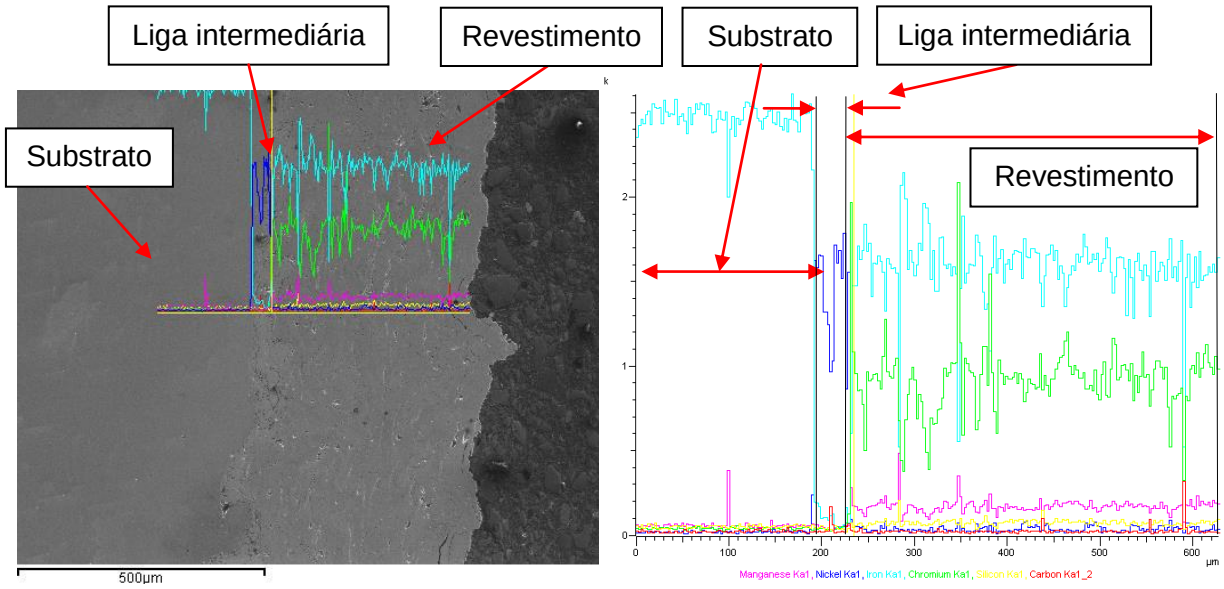
A Figura IV.28 (a) apresenta a morfologia e o espectro de EDS de linha da amostra da condição 3 em uma seção que contempla o substrato, liga intermediária, revestimento e baquelite. Já a Figura IV.28 (b) apresenta em detalhe o espectro de EDS da morfologia apresentada na Figura IV.28 (a). A Figura IV.29 apresenta a morfologia e o espectro de EDS pontual da amostra da condição 3 em um ponto aleatório no revestimento.

Através das Figuras IV.28 a IV.29 é possível observar que o revestimento da condição 3 apresenta elevadas concentrações de Fe, Co e Cr e pequenas concentrações de W e Si e a liga intermediária possui elevadas concentrações de Ni e Al e o substrato possui composição química majoritária basicamente formada por Fe. A partir desses resultados é possível validar qualitativamente os elementos químicos dos revestimentos estudados.

Tungstênio é o elemento de liga da tabela peródica que possui maior ponto de fusão, além de ter facilidade na formação de carbonetos. O carbono e o tungstênio deste modo afetam a dureza, a ductilidade e a resistência ao desgaste abrasivo (causado pela presença de partículas duras em contato com superfícies metálicas em movimento relativo) [64]. Carbonetos também são importantes constituintes das ligas de cobalto, sendo particularmente essenciais em contornos de grão, melhorando a resistência e ductilidade dos materiais. Também promovem aumento de resistência da matriz, e são necessários para o controle do tamanho de grão nas ligas trabalhadas. Alguns carbonetos são inafetados por tratamento térmico, enquanto outros requerem passos a serem seguidos para estarem presentes. São principalmente conhecidos por sua excepcional dureza e resistência ao desgaste e à corrosão. No entanto, sua fragilidade impediu seu uso como material puro, incentivando o desenvolvimento de compósitos de união metálica (cermets). Matrizes de metais dúcteis, como o cobalto, aumentam sua resistência de modo a evitar fratura frágil [65].

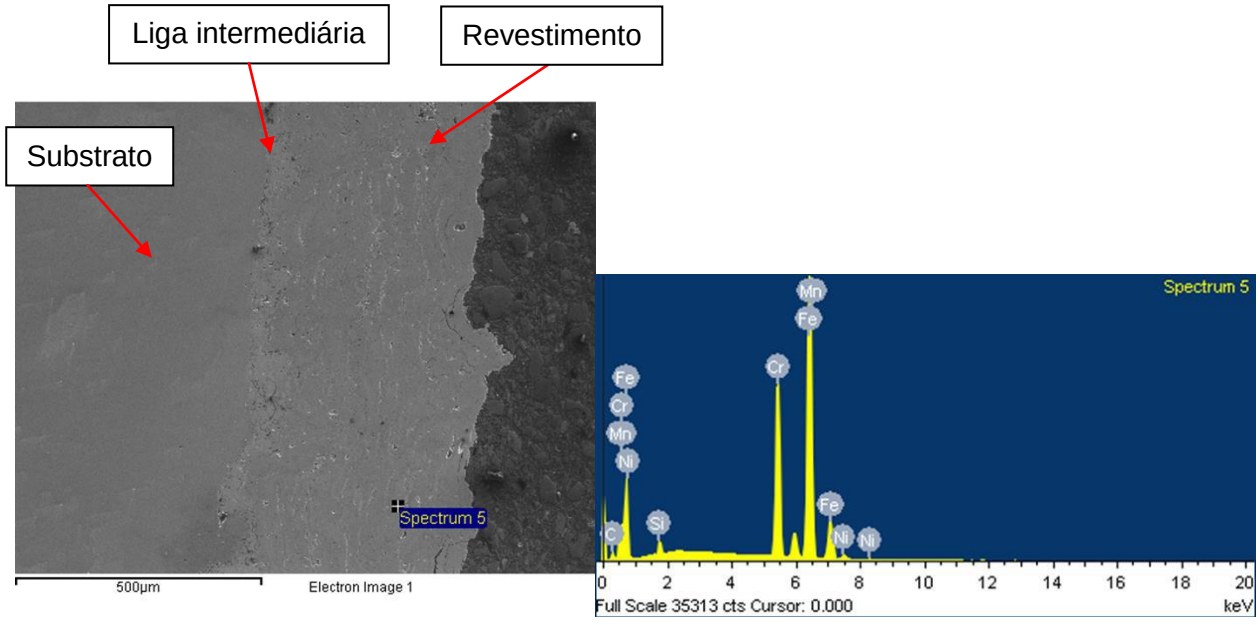
A Figura IV.29 (b) apresenta um espectro da área 6 que identifica presença de ferro, cobalto e cromo em hegemonia com relação aos outros elementos químicos. Nas regiões próximas da área 6 é observado a presença de microtrincas paralelas e perpendiculares ao sentido das lamelas. Este fato ocorre devido ao defeito de restrição a contração térmica das lamelas e também pelas características dos materiais adjacentes durante o resfriamento, além da microestrutura característica de depósitos metálicos e presença de boretos e óxidos.

Condição 4: Amostra tubular com revestimento a base de Ni e Cr sem epóxi



(a) (b)

Figura IV.30: (a) Morfologia da condição 4 (b) Espectro de EDS de linha para da área total.



(a) (b)

Figura IV.31: (a) Morfologia da condição 4 (b) Espectro de EDS pontual da área 5.

A Figura IV.30 (a) apresenta a morfologia e o espectro de EDS de linha da amostra da condição 2 sem epóxi em uma seção que contempla o substrato, liga intermediária, revestimento e baquelite. Já a Figura IV.30 (b) apresenta em detalhe o espectro de EDS da morfologia apresentada na Figura IV.30 (a). A Figura IV.31 (a) e (b) apresenta a morfologia e o espectro de EDS pontual da amostra da condição 4 em um ponto aleatório no revestimento.

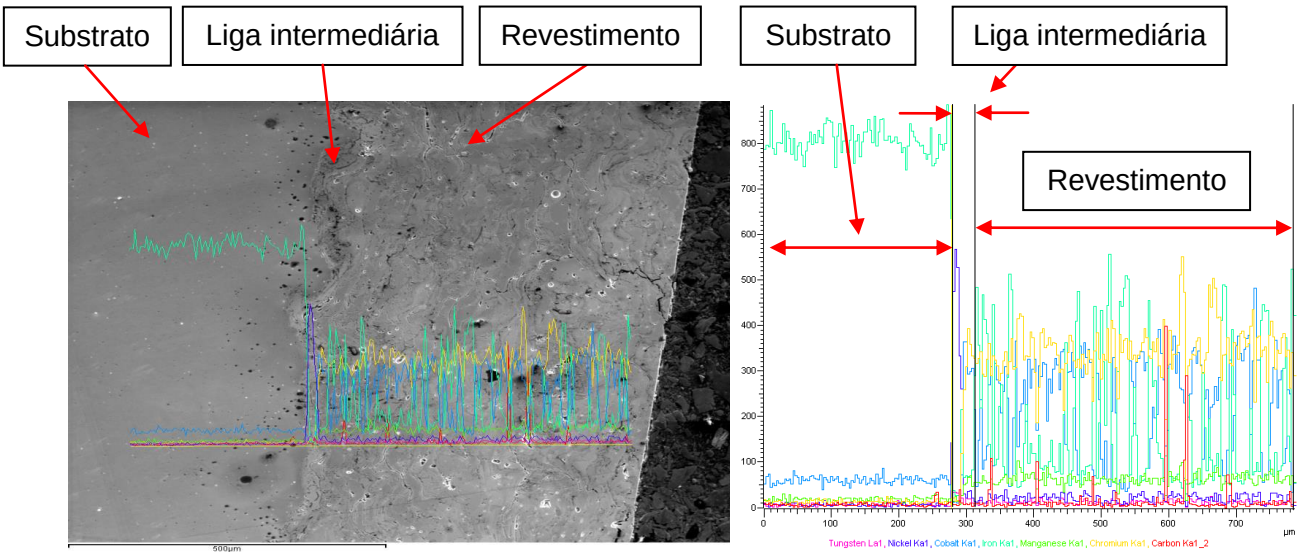
Pelas Figuras IV.30 a IV.31 é possível observar que o revestimento da condição 4 apresenta concentrações majoritárias de Fe, Mn e Cr; a liga intermediária possui elevadas concentrações de níquel e alumínio e o substrato possui composição química majoritária basicamente formada por ferro e manganês.

A Figura IV.31 (b) apresenta um espectro da área 5 que identifica presença de Fe, Mn, Ni e Cr em hegemonia com relação aos outros elementos químicos. Nas regiões próximas da área 3 é observado lamelas em formato regular sem aparentes concentrações de óxidos e vazios.

O silício, que é encontrado em baixas concentrações, propicia a redução da contração durante a solidificação, reduz a porosidade nas peças fundidas, além de reduz o coeficiente de expansão térmica e melhorar a soldabilidade [65]. Além destas características, pode-se citar o aumento da fluidez, da fundibilidade, da resistência mecânica e da resistência às trincas de solidificação [66].

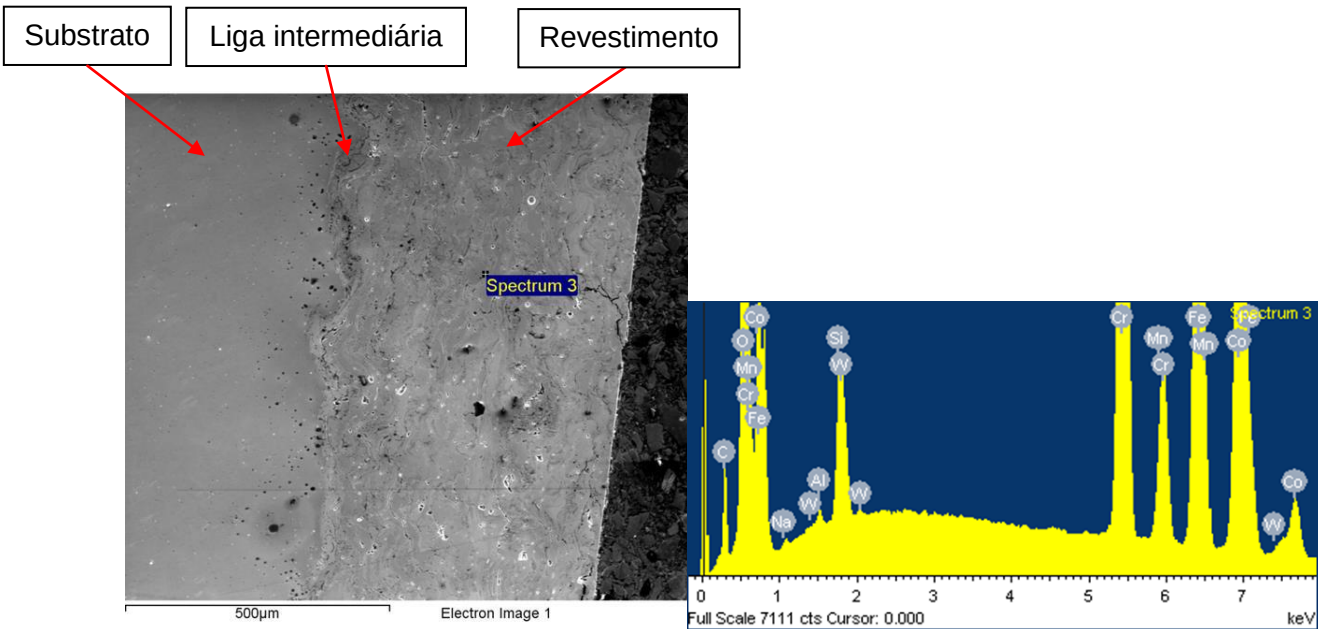
Nos revestimentos da condição 3, observam-se óxidos em maior quantidade e porosidades em menor quantidade do que nos revestimentos da condição 4. Nota-se, na condição 3, que as estruturas das lamelas são maiores do que as estruturas das lamelas da condição 1,2 e 4. Este fato também influencia na formação de porosidades, já que estruturas lamelares maiores possibilitam menores quantidades de poros.

Condição 5: Amostra tubular retificada, com aplicação de epóxi antes da retífica, com revestimento a base de Co



(a) (b)

Figura IV.32: (a) Morfologia da condição 5 (b) Espectro de EDS de linha para a área total.



(a) (b)

Figura IV.33: (a) Morfologia da condição 5 (b) Espectro de EDS pontual da área 3.

A Figura IV.32 (a) apresenta a morfologia e o espectro de EDS de linha da amostra da condição 1 retificada em uma seção que contempla o substrato, liga intermediária, revestimento e baquelite. Já a Figura IV.32 (b) apresenta em detalhe o espectro de EDS da morfologia apresentada na Figura IV.32 (a). A figura IV.33 apresenta a morfologia e o espectro de EDS pontual da amostra da condição 1 retificada em um ponto aleatório no revestimento.

As Figuras IV.32 a IV.33 indicam que é possível observar que o revestimento da condição 1 retificada apresenta concentrações majoritárias de Fe, Co e Cr; a liga intermediária possui elevadas concentrações de Ni e Al e o substrato possui composição química majoritária basicamente formada por Fe.

O cobalto é um metal com características e propriedades muito próximas às do níquel, porém com maior resistência mecânica e um custo ainda mais alto. A resistência à corrosão do cobalto também é elevada. Nas ligas de cobalto podem se formar vários tipos de carbetos diferentes, dependendo primordialmente da composição química da liga. A adição de elementos de liga deve ser controlada de modo a favorecer a distribuição e a estabilidade dos carbetos, o que melhora as propriedades mecânicas, principalmente em elevadas temperaturas [65].

Cobalto e suas ligas são utilizados em aplicações que requerem uma boa resistência à corrosão e ao desgaste. Estas ligas geralmente possuem boa resistência a altas temperaturas e, portanto, são usados em aplicações tais como turbinas de motores a jato e geradores de turbinas a gás. A boa resistência ao desgaste, resistência à fadiga, e biocompatibilidade de

ligas de cobalto tem solicitado a sua utilização como implantes ortopédicos. Ligas de cobalto também são utilizadas nas indústrias de alimentação e do processamento de produtos químicos nucleares. A deposição de ligas de cobalto por métodos de aspersão térmica oferece a vantagem de não haver diluição do substrato [64].

A Figura IV.33 (b) apresenta um espectro da área 3 que identifica presença de Fe, Co, Mn e Cr em hegemonia com relação aos outros elementos químicos. Nas regiões próximas da área 3 é observado a presença de concentrações de óxidos, porosidade e vazios, provavelmente resultantes da microestrutura resultante, do processo de aspersão térmica e de elevadas concentrações de ferro e de carbono que propiciam a formação de óxidos e de porosidades e vazios, respectivamente.

Condição 6: Amostra tubular retificada, com aplicação de epóxi antes da retífica, com revestimento a base de Ni e Cr

Para esta condição não foi possível realizar o ensaio de microscopia eletrônica de varredura. Foram encontrados diversos pontos de corrosão, impossibilitando a realização deste ensaio.

As condições 1, 2 e 6 possuem concentração de cerca de 3% de níquel, sendo assim um fator que pode acarretar na formação de microtrincas ao longo de seu revestimento, devido a suas propriedades.

Na Figura IV.28 (a) é mostrada uma micrografia da interface substrato-revestimento, onde é possível identificar defeitos no sentido transversal e longitudinal ao revestimento, criado durante o processo de aspersão térmica. Esses defeitos provavelmente ocorreram por fragilização gerada pela formação de carbetos de tungstênio e boretos. Esses defeitos geram porosidade e rede de óxidos que dificultam a aderência do revestimento a liga intermediária e em subsequência ao substrato.

Os revestimentos das condições 2 e 4 apresentam microestrutura de grãos menores e distribuidos uniformemente, sem defeitos grosseiros de solidificação. As Figuras IV.26 e IV.30 ilustram o espectro EDS de linha dos revestimentos, além de apresentar os percentuais dos elementos de liga majoritários no revestimento.

A análise por microscopia eletrônica de varredura apresentou melhores detalhes das amostras com relação a microscopia ótica, em termos de avaliação de revestimentos obtidos por aspersão térmica. A avaliação de características como tipos de porosidade, trincas, fases,

uniformidade de lamelas, interface entre o substrato e o revestimento, são fornecidos com maiores detalhes através de microscopia eletrônica de varredura.

Capítulo V – Conclusões

A partir do trabalho aqui apresentado foi possível obter diversas informações partir dos resultados encontrados na caracterização dos depósitos, ensaios de microdureza e porosidade. Os resultados apresentados neste estudo, e as discussões pertinentes conduziram as seguintes conclusões:

1. A utilização do processo de metalização à arco elétrico possibilitou a formação de camadas de revestimento uniforme, com estrutura lamelar espessam, formada por partículas que comportam em seu contorno finas películas acoizantadas, possivelmente contituidas de óxidos.
2. Os revestimentos feitos nas condições onde foram utilizadas chapas apresentam uma melhor uniformidade e menor variação de espessura do revestimento.
3. A partir da análise de porosidade realizada com base na metodologia de Vreijling, foi encontrado concentração de porosidade dentro das faixas informadas na literatura.
4. Os valores de microdureza obtidos pelo estudo foram maiores que os valores encontrados em referências com deposição de alumínio, principalmente pela formação de precipitados duros.
5. Através do controle mais preciso dos parâmetros de aspersão térmica é possível obter reduções atenuosas nas concentrações de porosidade e de óxidos.
6. Com relação aos valores de microdureza, das diversas condições analisadas, obteve-se uma grande variação em função do tipo de material de adição e localização da medição. Isso se deve fundamentalmente pela microestrutura anisotrópica do revestimento.
7. O processo de aspersão térmica à arco elétrico de ligas metálicas é uma técnica bastante eficaz na formação de revestimentos com elevada dureza superficial.
8. O cobalto é um elemento pouco estudado em termos de revestimento por metalização. A condição com a presença de cobaltorresultou em resultados satisfatórios de dureza e porosidade.

Capítulo VI – Sugestões para trabalhos futuros

1. Avaliar a resistência a corrosão dos revestimentos estudados neste trabalho, por meio da câmara de névoa salina. Considerando as áreas com selante e sem selante.
2. Analisar em termos de resistência adesiva, os revestimentos estudados, tanto antes como depois do ensaio de corrosão.
3. Estudo do comportamento dos revestimentos com relação a ensaios de desgaste abrasivo.
4. Utilizar outros métodos mais assertivos para quantificação de porosidade.
5. Avaliar os revestimentos quanto o teor de óxidos.
6. Detectar e identificar diversos tipos de óxidos presentes no revestimento, antes e depois do ensaio de corrosão, pelo método de difração de raios x.
7. Utilizar as técnicas de potencial a circuito aberto e polarização após o ensaio de corrosão. Estas técnicas fornecem informações como taxa de corrosão, auxiliando a análise do processo corrosivo dos materiais analisados.
8. Analisar amostras confeccionadas por outros parâmetros de aspersão, e outras técnicas de aspersão térmica, comparando as propriedades dos revestimentos, pelos ensaios apresentados neste estudo.

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] TS Society. Disponível em: <http://asmcommunity.asminternational.org/portal/site/tss/Spray Tips/>. Acesso em 20/07/2014.

[4] BERNDT, C. C., BERNECKI, T. et.al; *Handbook of Thermal Spray Technology*; 1ª edição, Ohio, ASM International, 2004.

[5] Flame Spray Technologies. Disponível em: <http://www.fst.nl/about-thermal-spray-process/>. Acesso em 19/07/2014.

[6] BCC Research. Disponível em: <http://www.bccresearch.com/market-research/advanced-materials/ceramic-coatings-technologies-avm015e.html>. Acesso em 19/07/2014.

[7] SÁ BRITO, V. R. S.; *Caracterização de Revestimentos Metálicos Aspergidos Termicamente por Arco Elétrico;* Dissertação de Mestrado; CEFET, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.

[8] ANTUNES, F. J.; *Avaliação de Adesão e da Resistência à Corrosão de Revestimentos de Cr e Co Obtidos Através de Técnicas de Aspersão Térmica;* Dissertação de Mestrado; CEFET, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013.

[9] 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.

[10] SOUZA, C.R; NASCIMENTO, P.M.; VOORZALD, H.J.C.; PIGATIN, W.L.; “Análise de fadiga, corrosão e desgaste abrasivo do cromo duro eletrodepositado e revestimento de carbeto de tungstênio por HVOF no aço ABNT 4340”, *Projeçoes*, v.19/20, pp. 59-69, Dezembro 2001.

[11] PAREDES, R. S. C. Aspersão Térmica. Curitiba: UFPR, 2009. Disponível em: http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM734/AT%20P%F3s%202014/Apostila%20Aspers%E3o%20T%E9rmica%202009.pdf. Acesso em 22/07/2014.

[12] MACHADO, I. G., *Soldagem e técnicas conexas*, Porto Alegre, RS, Brasil, 1996.

[13] Oerlikon Group, An Introduction to Thermal Spray. Disponível em: <http://www.oerlikon.com>. Acesso em 22/07/2014.

[14] LIMA, C.C., TREVISAN, R.; *Aspersão Térmica Fundamentos e Aplicações*; 2ª edição; São Paulo, Editora Artliber, 2007.

[15] SAREMI, M.; VALEFI Z.; ‘’The effects of spray parameters on the microstructure and thermal stability of thermal barrier coatings formed by solution precursor flame spray (spfs)”; *Surface & Coatings Technology;* v. 220; n. 21; pp. 44-51; April 2013.

[16] 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.

[17] KREPSKI, R. P.; *Thermal Spray Coatings Applications in the Chemical Process Industries*; NACE International, Texas, USA, 1993.

[18] PAWLOWSKI, L.; *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*; 1ª edição; Reino Unido, Wiley Publishing, 1995.

[19] MARQUES, P. V. Aspersão Térmica. Minas Gerais: UFMG, 2003. Disponível em: http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/processos_solda/asperso-termica.pdf. Acesso em: 24/07/2104.

[20] Oerlikon Group. Disponível em: http://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/coating-equipment/thermal-spray/processes/processes-combustion-powder/, Acesso em 24/07/2014.

[21] WATANABE, M.; KURODA, S.; YOKOYAMA, K.; INOUE, T.; GOTOH, Y.; “Modified tensile adhesion test for evaluation of interfacial toughness of HVOF sprayed coatings”; *Surface & Coatings Technology*, v. 220, n. 23, pp. 1746-1752, July 2008.

[22] 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.

[23] SANTOS, A. O.; *Estudo da resistência a corrosão em aço e revestimentos visando aplicação em hastes de bombeio de petróleo*, Dissertação de Mestrado; UNIT, Aracaju, SE, Brasil, 2008.

[24] WILSON, W., *Thermal Sprayed Aluminium for Subsea Heat Exchanger Surfaces*, Dissertação de Mestrado, Trondheim, Noruega, 2014.

[25] MARONHO, O., *Aspersão térmica de ferro fundido branco multicomponente*, Tese de Doutorado, USP, São Paulo, Brasil, 2006.

[26] SANTOS, E. F., TOLEDO, L. B., CARRILHO, M. S. Disponível em: <http://www.infosolda.com.br/jc_perg_down/id68.pdf>. Acesso em 23/08/2014.

[27] 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.

[28] Norma NBR 6405, Rugosidade das Superfícies, 1988.

[29] Norma ISO 8501-1:1988, Preparation of Steel Substrates before Application of Paints and Related Products – Visual Assessment of Surface Cleanliness. 1988.

[30] PANOSIAN, Z., 2001, Revestimentos Metálicos para Proteção contra Corrosão, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Florianópolis.

[31] Norma NACE N°1 / SSPC-SP 5, White Metal Blast Cleaning.

[32] Norma PETROBRAS N-2568, *Revestimentos Anticorrosivos Aplicados por Aspersão Térmica*, Janeiro 2004.

[33] JAMES, D. H., "A review of experimental findings in surface preparation for thermal spraying", *Journal of Mechanical Working Technology*, v. 10, pp. 221-232, February 1984.

[34] SCHIEFLER, M. F., *Estudos microestrutural e eletroquímico de revestimentos metálicos depositados por aspersão térmica*, Tese de Doutorado; UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 2004.

[35] PADILHA, H., *Estudo sobre revestimento depositados por aspersão térmica para melhorar o desempenho de conexões elétricas*, Dissertação de Mestrado; PIPE/UFPR, Curitiba, PR, Brasil, 2005.

[36] NOVICKI, N., *Aplicação da Aspersão Térmica na Soldagem em Operação de Tubulações com Pequena Espessura Remanescente*, Dissertação de Mestrado; UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 2008.

[37] PANOSSIAN, Z., "Revestimentos Metálicos para Proteção contra Corrosão", *Congresso Latino Americano de Corrosão*, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Florianópolis, Brasil, 2001.

[38] 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.

[39] McPherson, R.; “A review of microstructure and properties of plasma sprayed ceramic coatings”, *Surface & Coatings Technology*, v. 39, n. 40, pp. 173-181, December 1989.

[40] MCPHERSON, R., *The relationship between the Mechanism of Formation, Microstructure and Properties of Plasma-Sprayed Coatings*, Thin Solids Films, v. 83, n. 3, pp. 297-310, 1981. APUD 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.

[41] MCPHERSON, R., *A Model for the Thermal Conductivity of Plasma-Sprayed Ceramic Coatings*, Thin Solids Films, v. 112, n. 1, pp. 89-95, 1984. APUD 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.

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

[43] ZIMMERMANN, S. and KREYE, H. Testes de corrosão em camadas térmicamente aspergidas. Curso de especialização “Proteção contra a corrosão por revestimentos depositados por aspersão térmica”, UFSC/EMC/Labsolda, Florianópolis, SC, Brasil, Abril 1997.

[44] PAREDES, R.C., RODRIGUEZ, R. M. H. P., CAPRA, A., VIANNA, G. V., PIZA, M.T., "Resistência à Corrosão de Revestimentos de Alumínio no Ensaio de Névoa Salina", *7ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos (COTEQ)*, Florianópolis, SC, Brasil, Setembro 2003.

[45] 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. APUD 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, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

[46] Thermal Spray Coatings. Disponível em: <http://www.corrosion.com/thermal-sec6.html>, Acesso em 13/11/2014.

[47] ALMEIDA, D. S.; *Estudo De Revestimentos Cerâmicos Sobre Substrato Metálico, Obtidos por Deposição Física de Vapores por Feixe de Elétrons para Aplicação como Barreira Térmica*, Tese de Doutorado, INPE, São José dos Campos, SP, Brasil, 2005.

[48] Olympus, extensions for digital metallography. Disponível em: <http://www.lri.se/pdf/olympus/Stream_Extensions.pdf>, Acesso em 22/12/2014.

[49] 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.

[50] SEVOSTIANOV, L., KACHANOV, M., “Elastic and Conductive Properties of Plasma-Sprayed Ceramic Coatings in Relation to Their Microstructure: An Overview”, *Journal of Thermal Spray Technology*, v. 18, n. 5, pp. 822-834, April 2009.

[51] KAVKA, T., MATEJICEK, J., CTIBOR, P., MASLANI, A., HRABOVSKY, M., “Plasma Spraying of Copper by Hybrid Water-Gas DC Arc Plasma Torch”, *Journal of Thermal Spray Technology*, v. 20, n. 4, pp. 760-774, June 2011.

[52] DESHPANDE, S., KULKARNI, A., SAMPATH, S., HERMAN, H., “Application of image analysis for characterization of porosity in thermal spray coatings and correlation with small angle neutron scattering”, *Surface & Coatings Technology*, v. 187, pp. 6-16, 2004.

[53] REZAEY, R., SALAVATI, S., PERSHIN, L., COYLE, T., CHANDRA, S., MOSTAGHIMI, J., “Fabrication of Wire Mesh Heat Exchangers for Waste Heat Recovery Using Wire-Arc Spraying”, *Journal of Thermal Spray Technology*, v. 23, n. 4, pp. 609-615, April 2014.

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

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

[56] MARCHIS, L. K., “Correlação dos mecanismos de oxidação com parâmetros de aspersão térmica a arco elétrico na deposição de alumínio”, Dissertação de Mestrado, UFPR, Paraná, PR, Brasil, 2008.

[57] TASSI, F., PAREDES, R. S. C., MARIANO, C., GUERRERO, G. E.; “AVALIAÇÃO DA DIFUSÃO DO CARBONO EM REVESTIMENTO DE ALUMÍNIO DEPOSITADO PARA PROTEÇÃO CONTRA A PRECIPITAÇÃO DE COQUE”, *4º PDPETRO*, pp. 21-24, Campinas, SP, Brasil, Outubro 2007.

[58] FACTOR, M., ROMAN, I., “Vickers microindentation of WC 12%Co thermal spray coating Part 1: statistical analysis of microhardness data”, *Surface and Coating Technology*, v. 132, n. 12, pp. 181-193, 2000.

[59] CAPRA, A.R., *Desenvolvimento de intermetálicos Fe/Al através de Aspersão Térmica e tratamento posterior*, Dissertação de Mestrado; UFPR, Curitiba, PR, Brasil, 2005.

[60] HEARLEY, J. A., LITTLE, J. A., SURGEON, A. J., “The effect of spray parameters on the properties of high velocity oxi-fuel Ni-Al intermetallic coating”, *Surface and Coating Technology*, v. 123, n. 23, pp. 210-218, 2000.

[61] ZHAO, L., MAURER, M., FISCHER, F., DICKS, R., LUGSCHEIDER, E., Influence of spray parameters on the particle in-flight properties and the properties of HVOF coatings of WC-Co-Cr, *Wear*, v. 257, n. 1-2, pp. 41-46, 2004.

[62] ALMEIDA, V. A. B., D’OLIVEIRA A.S.C.M, “FORMAÇÃO IN-SITU DE INTERMETÁLICOS DO TIPO β-NiAl”, *17° CBECIMat*, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, Novembro 2006.

[63] CONTRERAS, J. P. C., “CARACTERIZACIÓN DE RECUBRIMIENTOS DEPOSITADOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA DE ALTA VELOCIDAD Y APORTES DE SOLDADURA PTA”, Tese de graduação, Uiversidade do Chile, Santiago, SA, Chile, 2005.

[64] ASM International. *ASM Handbook*, Vol 13 Corrosion; 9ª edição; EUA, ASM Internacional, 1997.

[65] Notícias Metalurgicas. Disponível em: <http://www.infomet.com.br>. Acesso em 18/01/2015.

[66] FURLAN, T.S, *Influência do Teor de Estrôncio na Modificação da Liga A356*, Tese de Mestrado, USP, São Paulo, SP, Brasil, 2008.