

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

WILLIAN NARDI

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DOS
REVESTIMENTOS DE ALUMÍNIO E AÇO INOXIDÁVEL
DEPOSITADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA À ARCO ELÉTRICO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PONTA GROSSA
2017**

WILLIAN NARDI

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DOS
REVESTIMENTOS DE ALUMÍNIO E AÇO INOXIDÁVEL
DEPOSITADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA À ARCO ELÉTRICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof^a Sandra Mara Kaminski Tramontin – Mestrado.

PONTA GROSSA

2017



TERMO DE APROVAÇÃO

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DOS REVESTIMENTOS DE ALUMÍNIO E AÇO INOXIDÁVEL DEPOSITADAS EM CHAPAS DE ALUMÍNIO POR ASPERSÃO TÉRMICA

por

WILLIAN NARDI

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 29 de junho de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Profa. Ma. Sandra Mara Kaminski Tramontin
Orientadora

Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz
Membro Titular

Prof. Dr. Oscar Regis Júnior
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

**Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho**
Coordenador do Curso

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por nos dar a vida, a alegria, o amor e a união para estarmos aqui, reunidos, desfrutando juntos, destes momentos que nos são tão importantes.

Em especial aos meus pais, ao meu irmão e a toda a minha família pelo carinho e dedicação de estarem sempre junto comigo apoiando, incentivando e ajudando em todos os momentos.

Aos meus amigos, pelos diferentes momentos que passamos juntos.

A professora, orientadora e amiga Sandra Mara Kaminski Tramontin, pela oportunidade, paciência e ajuda dedicada.

E a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desse trabalho.

RESUMO

NARDI, Willian. **Caracterização Microestrutural dos Revestimentos de Alumínio e Aço Inoxidável Depositados por Aspersão Térmica à Arco Elétrico**. 2017. 50. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

No presente trabalho propõe-se a caracterização e comparação, através da microscopia ótica, de dois materiais de revestimentos obtidos por aspersão térmica. Utilizou-se o processo de aspersão térmica por arco elétrico, depositando alumínio ER 5356 e aço inoxidável 309 LS em um substrato de alumínio e com os mesmos parâmetros de aspersão. Através da microscopia ótica os corpos de prova foram analisados conforme a espessura, interface, qualidade e uniformidade das camadas revestidas. Como resultado do estudo foi possível observar que as amostras revestidas com alumínio tiveram camadas mais espessas de revestimento, além de apresentarem um recobrimento total em toda a superfície, ao contrario do aço inoxidável que apresentou valores de espessura bem inferiores e um revestimento com regiões sem cobertura para os parâmetros utilizados.

Palavras-chaves: Aspersão térmica. Arco elétrico. Revestimento superficial. Caracterização de superfície.

ABSTRACT

NARDI, Willian. **Microstructural Characterization of Aluminum and Stainless Steel Coatings Placed by Thermal Spraying Electric Arc**. 2017. 50. Course Completion Work - Federal Technological University of Paraná, Ponta Grossa, 2017.

The present work proposes the characterization and comparison, by means of optical microscopy, of two coating materials obtained by thermal spraying. The thermal spraying through electric arc process was used to deposit aluminum ER 5356 and 309 LS stainless steel on aluminum substrate with the same spraying parameters. Through the optical microscopy, the specimens were analyzed according to the thickness, interface, quality and uniformity of the coated layers. As a result of the study it was possible to observe that the aluminum coated samples had thicker layers of coating, besides having a thorough coating over the entire surface, unlike stainless steel that presented much lower thickness values and a coating with uncovered regions considering the parameters used.

KEYWORDS: Thermal spraying. Electric Arc. Surface coating. Surface characterization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema do procedimento de aspersão térmica	14
Figura 2 - Esquema da seção transversal de um revestimento aspergido termicamente.....	15
Figura 3 - Velocidade de impacto das partículas em função do processo utilizado ..	16
Figura 4 - Princípio de funcionamento utilizando pó.....	17
Figura 5 - Esquema da seção transversal da tocha por chama usando arame.....	18
Figura 6 – Pistola de aspersão térmica por chama convencional para arame	19
Figura 7 – Tocha de aspersão por chama convencional usando arame	19
Figura 8 – Esquema dos equipamentos necessários na aspersão térmica por chama convencional	20
Figura 9 – Seção transversal da tocha por aspersão por chama de pó	21
Figura 10 – Tocha de aspersão por chama convencional usando pó	21
Figura 11 – Pistola de aspersão térmica por chama de pó	21
Figura 12 – Esquema do processo a arco elétrico	23
Figura 13 – Representação dos componentes do equipamento a arco elétrico.....	24
Figura 14 – Fluxograma das etapas adotadas no procedimento experimental	28
Figura 15 – Guilhotina Clark TG 256.....	29
Figura 16 – Máquina de corte (marca: Solotest / modelo: Maxicut) com proteção fechada	31
Figura 17 – Embutidora Buehler SimpliMet XPS1	32
Figura 18 – Exemplo de amostras embutidas	32
Figura 19 – Lixadeira e politriz Fortel PLF.....	33
Figura 20 – Politriz Buehler Beta.....	34
Figura 21 – Microscópio Olympus BX60 juntamente com o software AnalySIS©.....	34
Figura 22 – Microscopias das amostras revestidas com alumínio obtidas com pressão de 600 kPa e com tensões de 35,3 V (a, b) e 41,1 V (c, d)	35
Figura 23 – Microscopias das amostras revestidas com alumínio obtidas com pressão de 500 kPa e com tensões de 35,1 V (a, b) e 40,4 V (c, d)	37
Figura 24 – Microscopias das amostras revestidas com inox obtidas com pressão de 500 kPa e com tensões de 35 V (a,b) e 40,3 V (c, d).....	38
Figura 25 – Microscopias das amostras revestidas com inox obtidas com pressão de 600 kPa e com tensões de 40,3 V (a, b) e 35 V (c, d).....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Temperaturas de fonte de calor.....	16
Tabela 2 – Subdivisão dos grupos revestidos com cada material.....	30
Tabela 3 – Pressão e tensão para os grupos do material Alumínio ER 5356	30
Tabela 4 – Pressão e tensão para os grupos do material Aço Inox 309 LS.....	31
Tabela 5 – Valores de espessura de camada das amostras Al A1 e Al A2 com tensão de 35,3 V e amostras Al B1 e Al B2 com tensão de 41,1 V.....	41
Tabela 6 - Valores de espessura de camada das amostras Al C1 e Al C2 com tensão de 35,1 V e amostras Al D1 e Al D2 com tensão de 40,4 V.	43
Tabela 7 - Valores de espessura de camada das amostras Inox E1 e Inox E2 com tensão de 35 V e amostras Inox F1 e Inox F2 com tensão de 40,3 V.....	45
Tabela 7 - Valores de espessura de camada das amostras Inox E1 e Inox E2 com tensão de 35 V e amostras Inox F1 e Inox F2 com tensão de 40,3 V.....	46
Tabela 8 – Valores de espessura de camada das amostras Inox G1 e Inox G2 com tensão de 40,3 V e amostras Inox H1 e Inox H2 com tensão de 35 V	47
Tabela 8 – Valores de espessura de camada das amostras Inox G1 e Inox G2 com tensão de 40,3 V e amostras Inox H1 e Inox H2 com tensão de 35 V	48

LISTAS DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Valores de espessura de camada das amostras dos Grupos Al A e Al B	42
Gráfico 2 – Valores de espessura de camada das amostras dos grupos Al C e Al D	44
Gráfico 3 – Valores de espessura de camada das amostras dos grupos Inox E e Inox F	46
Gráfico 4 – Valores de espessura de camada das amostras dos grupos Inox G e Inox H.....	48

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. OBJETIVO GERAL	12
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1. FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA	13
2.2. CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS	16
2.2.1. Aquecimento por Chama Convencional	17
2.2.2. Aspersão Térmica a Arco Elétrico	22
2.3. PROPRIEDADES DOS REVESTIMENTOS POR ASPERSÃO TÉRMICA	24
2.3.1. Adesão	24
2.3.2. Porosidade	25
2.3.3. Oxidação	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	29
3.1.1. Aquisição da Chapa	29
3.1.2. Jateamento	29
3.1.3. Revestimento por Aspersão Térmica	30
3.1.4. Corte e Embutimento	31
3.1.5. Lixamento	33
3.1.6. Polimento	33
3.1.7. Microscopia Ótica	34
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1. ANÁLISE METALOGRAFICA	35
4.1.1. Substrato de Alumínio com Revestimento de Alumínio	35
4.1.2. Substrato de Alumínio com Revestimento de Inox	38
4.2. MEDIÇÕES DE ESPESSURA DE CAMADA	40
4.2.1. Substrato de Alumínio com Revestimento de Alumínio	40
4.2.2. Substrato de Alumínio com Revestimento de Inox	45
5. CONCLUSÃO	50
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

1. INTRODUÇÃO

A aspersão térmica é um procedimento em que partículas aspergidas na condição fundida ou semifundida são depositadas em uma superfície devidamente preparada, formando assim uma camada de revestimento. Essas partículas necessitam de calor suficiente para a operação podendo vir da queima de um combustível ou da geração de um arco elétrico. Ao serem aquecidas, essas partículas são lançadas por meio de um gás comprimido até a superfície do substrato que, achatam-se, resfriam-se e aderem-se às irregularidades da superfície originando-se uma estrutura típica lamelar. Nessa estrutura lamelar é possível encontrar inclusões de óxidos, regiões sem cobertura e porosidades.

No início, a aspersão térmica era bastante utilizada para a proteção de superfícies contra a corrosão. Atualmente, devido aos avanços de pesquisas relacionadas a novos materiais, os revestimentos utilizados também servem para elevar a resistência ao desgaste, à corrosão, isolamento térmico e elétrico e contra incompatibilidades químicas e biológicas.

Enquanto o processo de aspersão térmica não era muito difundido, o material utilizado para revestir as superfícies na maioria dos casos era o zinco. Com o passar dos anos, a evolução dos materiais e dos processos de aspersão fez com que essa técnica ficasse mais conhecida e novos materiais passaram a ser utilizados como aços inoxidáveis, alumínio, carbetos, cerâmicos e outros.

Esse processo de revestimento de superfícies vem sendo bastante utilizado nas indústrias de petróleo, de alimentos, infraestrutura e entre outras, uma vez que necessitam aumentar a vida útil de sistemas e peças.

Para analisar se essa estrutura lamelar possui inclusões de óxidos, porosidades ou regiões sem cobertura, um estudo através de análise metalográfica se faz bastante necessário. A metalografia é responsável pelo estudo da estrutura interna dos metais e suas ligas, relacionando a mesma com a composição química, propriedades físicas e mecânicas. Ela tem sido bastante utilizada para avaliar a presença de vazios, inclusões, defeitos e extensão de revestimentos, que é o que estará presente neste trabalho.

1.1. OBJETIVO GERAL

Caracterizar e comparar, por meio da microscopia ótica, dois materiais de revestimento obtidos por aspersão térmica: alumínio e aço inoxidável, utilizando os mesmos substrato e parâmetros de aspersão.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Revestir, por aspersão térmica, o substrato chapa de alumínio, com alumínio e aço inoxidável, variando os parâmetros do processo com duas pressões e duas tensões diferentes para ambos os revestimentos.

Caracterizar no revestimento, por microscopia ótica, a influência dos parâmetros utilizados nas camadas aspergidas, verificando assim a espessura, interface e uniformidade das camadas obtidas para cada um dos revestimentos.

Avaliar no revestimento, por microscopia ótica, a influência da variação dos parâmetros de aspersão utilizados na espessura, interface e uniformidade das camadas obtidas para cada um dos revestimentos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA

A aspersão térmica é uma técnica de revestimento onde materiais metálicos ou não metálicos, finamente divididos, são depositados em uma superfície devidamente preparada, na condição fundida ou semifundida, para formar uma camada superficial com características próprias (NOVICKI, 2008). Os materiais para revestimentos, que podem estar na forma de pó, cordão, vareta ou arame, são aquecidos por uma pistola de aspersão que gera o calor necessário para a operação. Esse calor necessário pode vir da queima de um gás combustível ou da geração de um arco elétrico (SAMPSON, 1997).

Quando os materiais de revestimentos são fundidos, eles são acelerados sob pressão, por meio de um gás comprimido, contra a superfície a ser revestida. Para Dorfman (2002), esses materiais ao se chocarem contra a superfície, acabam se achatando e aderindo ao material base e logo em seguida sobre as partículas já existentes, originando camadas em forma lamelar contendo inclusões de óxidos, vazios e porosidades.

De acordo com Dorfman (2002), qualquer material que não se decomponha quando fundido pode ser utilizado como revestimento. Isso significa que uma grande quantidade de materiais dentre eles, a maioria dos metais, materiais cerâmicos, compostos intermetálicos, alguns plásticos orgânicos e certos vidros são capazes de serem depositados por um ou mais processos de aspersão.

A natureza do processo de aspersão térmica é considerada sinérgica, ou seja, é um processo onde existe um número muito grande de variáveis e componentes envolvidos que, quando atuam juntos e aplicados de forma apropriada, é capaz de produzir um efeito maior do que considerados individualmente. Essas variações estão ligadas aos materiais utilizados, aos métodos de aquecimento e aos métodos de aceleração das partículas em direção à superfície (AWS, 1985).

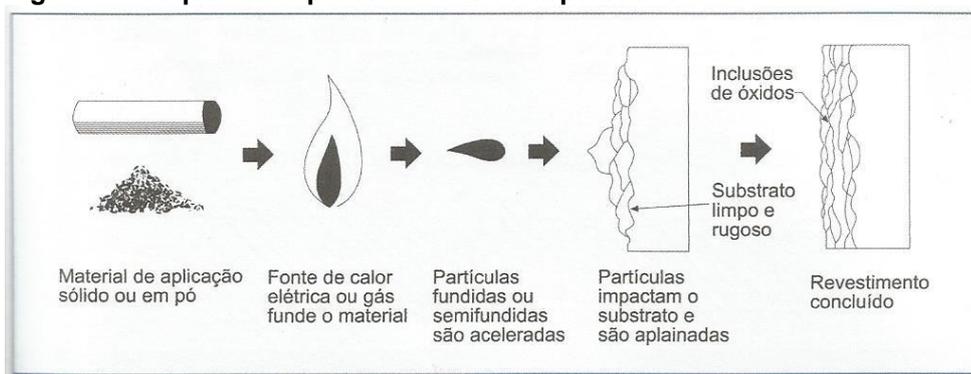
No quadro 1 a seguir é mostrado que, dependendo da fonte de calor usada, os processos de aspersão térmica são classificados em dois grupos.

Quadro 1 – Processo de aspersão térmica

Combustão	Elétrico
Chama	Plasma
Detonação	Arco

Fonte: Lima e Trevisan (2007)

Um esquema geral da aplicação da técnica de aspersão é mostrado na figura 1.

Figura 1 – Esquema do procedimento de aspersão térmica

Fonte: Lima e Trevisan (2007)

O processo de revestimento por aspersão térmica apresentam três aspectos básicos:

- Substrato;
- Camadas de ligação ou adesão;
- Estrutura de revestimento.

Os substratos são os locais onde os revestimentos são depositados. Esses locais podem ser metais, óxidos, vidros, cerâmicas, plásticos e até madeiras. Nem todos os revestimentos podem ser aplicados sobre todos os substratos, sendo que para alguns é necessário possuir técnicas especiais para aplicação (SUGANUMA, MYIAMOTO e KOIZUMI, 1988). Antes da realização da aspersão é necessária uma preparação adequada do substrato, independente do processo a ser usado. Cada processo recebe a mesma preparação que consiste em limpeza da superfície, a qual eliminará a ação de contaminantes, e obtenção da rugosidade, o qual propicia um aumento na área superficial efetiva, melhorando a adesão (WINKLER e PARKER, 1992). Segundo ainda Winkler e Parker (1992), a etapa mais crítica que influencia na resistência de ligação e na adesão do revestimento é a preparação adequada do substrato.

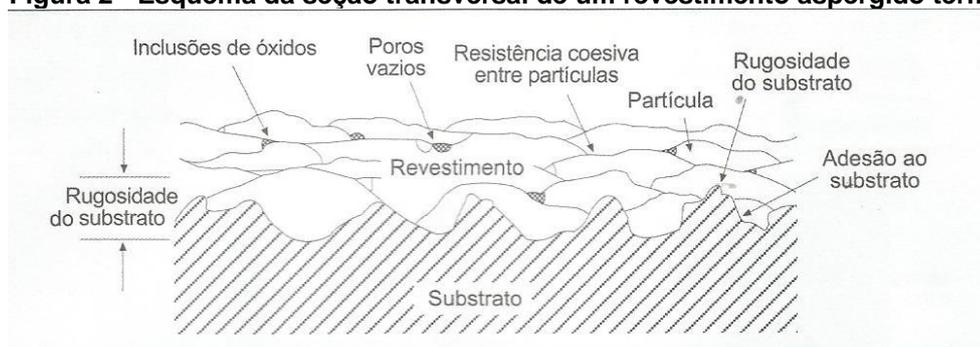
As camadas de ligação ou adesão são ligações existentes entre o revestimento e o substrato, podendo ser ainda ligações mecânicas, químicas, metalúrgicas, físicas ou uma combinação destas. Uma série de fatores, tais como: material de revestimento; condição da superfície; rugosidade; limpeza; temperatura do substrato antes, durante e após o procedimento de aspersão; e velocidade de impacto da partícula influencia na adesão (THORPE, 1993).

A estrutura do revestimento e a química do depósito aspergido em ar ambiente se diferenciam do material no estado original. Estas diferenças que existem são geradas devido à natureza do revestimento, à reação com gases presentes no processo e à atmosfera em contato com o material enquanto líquido (AWS, 1985). Por exemplo, quando ar e oxigênio fazem parte dos gases de processo, óxidos do material são formados e se incorporam ao revestimento. Revestimentos de materiais metálicos tendem a ser porosos e frágeis, se comparados com a dureza de um material original (TUCKER, 1993).

A estrutura do revestimento aspergido é similar quanto à natureza lamelar, mas podem existir diferenças nas características em função do processo, dos parâmetros, da técnica empregada e do material utilizado. A densidade do depósito aspergido varia de acordo com a temperatura da fonte de calor utilizada no processo de revestimento e com a velocidade das partículas (CAPRA, 2005). A temperatura utilizada no processo pode variar de 2.000 °C até 28.000 °C dependendo da fonte de calor, já a velocidade pode variar desde 30 m/s até quase 1.200 m/s em função do processo utilizado.

A figura 2 ilustra, esquematicamente, a seção transversal de um material aspergido.

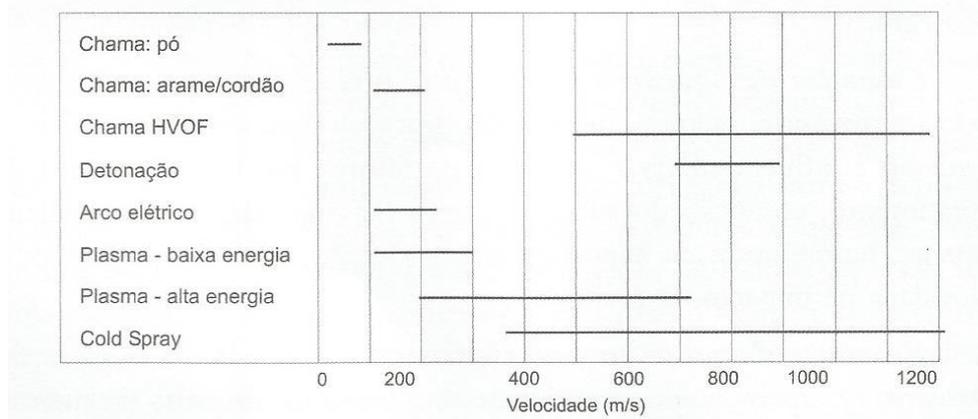
Figura 2 - Esquema da seção transversal de um revestimento aspergido termicamente



Fonte: Lima e Trevisan (2007)

A figura 3 mostra a velocidade de impacto das partículas em função do processo utilizado.

Figura 3 - Velocidade de impacto das partículas em função do processo utilizado



Fonte: Lima e Trevisan (2007)

A tabela 1 a seguir mostra as temperaturas em função das fontes de calor.

Tabela 1 – Temperaturas de fonte de calor

Fonte	Temperatura (°C)	Temperatura (°F)
Propano, oxigênio	2.525 – 2.640	4.579 – 4.785
Gás natural, oxigênio	2.538 – 2.735	4.600 – 4.955
Hidrogênio, oxigênio	2.660 – 2.690	4.820 – 4.875
Propileno, oxigênio	2.843	5.240
MAPP, oxigênio	2.927	5.301
Acetileno, oxigênio	3.087 – 3.100	5.589 – 5.625
Arco plasma	2.200 – 28.000	4.000 – 50.000

Fonte: Lima e Trevisan (2007)

2.2. CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS

Os processos de aspersão térmica são classificados de acordo com o método de geração de calor. Para os processos que utilizam gases combustíveis como fonte de calor, podemos dividi-los em:

- Chama;
- Detonação.

Já os processos que utilizam energia elétrica como fonte de calor, podemos dividi-los em:

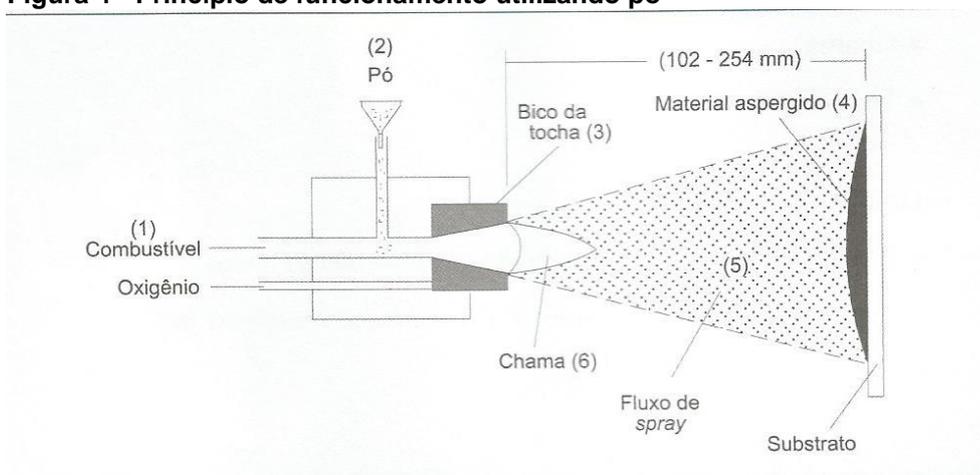
- Plasma;
- Arco elétrico.

2.2.1. Aquecimento por Chama

O processo de combustão por chama é o mais antigo dos processos, sendo possível a utilização de uma grande variedade de materiais. Utiliza como fonte de calor a combustão de gases combustíveis e oxigênio. A temperatura da chama pode variar de 2.700 °C a 3.100 °C e a velocidade entre 80 m/s a 100 m/s (PAWLOWSKI, 2008). Os materiais para revestimentos podem estar na forma de arames, pós ou varetas. Para a tocha se adaptar a diferentes ligas, gases ou tamanhos de arame, é necessário a mudança do bico e da tampa de ar (PARKER e KUTNER, 1991).

Quando se utiliza material de alimentação na forma de pó, ele é direcionado até a chama de forma axial por alimentadores remotos, ou por gravidade. No caso da utilização do arame, ele é conduzido até o bico da pistola de forma axial ou radial por uma turbina movida geralmente por ar comprimido (KREPSKI, 1993). O princípio de funcionamento pode ser observado na figura 4, sendo ilustrado o uso de pós como material de deposição.

Figura 4 - Princípio de funcionamento utilizando pó



Fonte: Lima e Trevisan (2007)

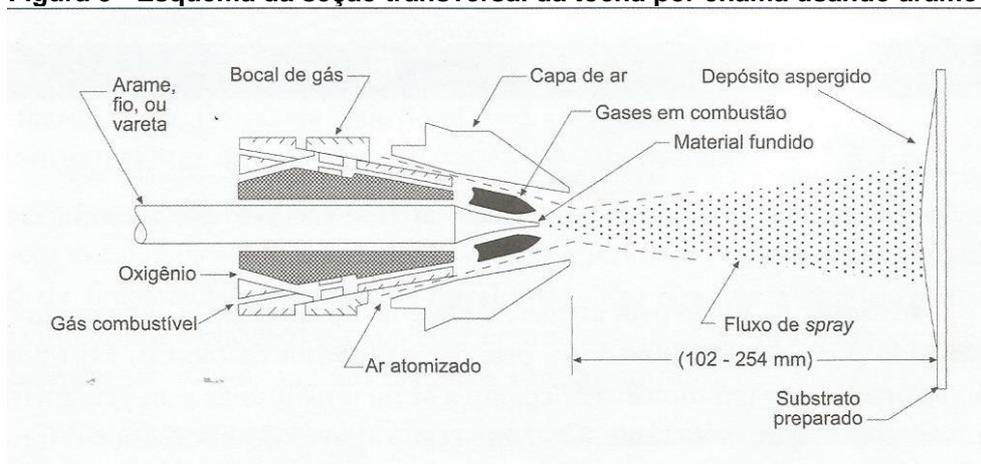
No método de aspersão por chama, as tochas, em sua maioria, são adaptadas para usar diversas combinações de gases, otimizando os custos e a

qualidade do revestimento. Nesse tipo de método, o acetileno, propano, metil-acetileno-propadieno (MAPP) e hidrogênio, combinados juntamente com o oxigênio, são os gases mais utilizados. Dentre esses gases, o acetileno é, certamente, o mais utilizado pelo motivo de possibilitar temperaturas de chama maiores, além de ter baixo custo (LIMA e TREVISAN, 2007).

2.2.1.1. Aspersão térmica a chama arame

A tocha de aspersão por chama utilizando arames possui um equipamento no qual o sistema de alimentação é feito por roletes que são tracionados por motor elétrico, pneumático ou por uma turbina de ar. O material utilizado na tocha é direcionado pela parte posterior da mesma. Um esquema pode ser observado através da figura 5.

Figura 5 - Esquema da seção transversal da tocha por chama usando arame



Fonte: Lima e Trevisan (2007)

O arame segue através do bocal, de forma concêntrica e contínua, e é fundido por uma chama de gás combustível usada apenas para fusão e não para propulsão ou transporte de material de revestimento. E para aspergir o material é utilizado ar comprimido e devido à configuração do bocal, o fluxo de ar lançado sobre as partículas fundidas faz com que haja uma pulverização com maior velocidade até o substrato (MARQUES, 2003).

Neste procedimento o oxigênio contido no ar faz as partículas oxidarem, prejudicando assim a aderência. Para que se tenha um menor nível de oxidação das

partículas, o ar comprimido pode ser substituído por um gás inerte (MARQUES, 2003).

Os diâmetros dos arames variam de 3 mm a 6 mm e a taxa de alimentação fica entre 40 g/min e 650 g/min (PAWLOWSKI, 2008).

A figura 6 mostra a pistola utilizada na aspersão por arame.

Figura 6 – Pistola de aspersão térmica por chama convencional para arame



Fonte: Novicki (2008)

Já a figura 7 ilustra a tocha de aspersão térmica por chama usando arame.

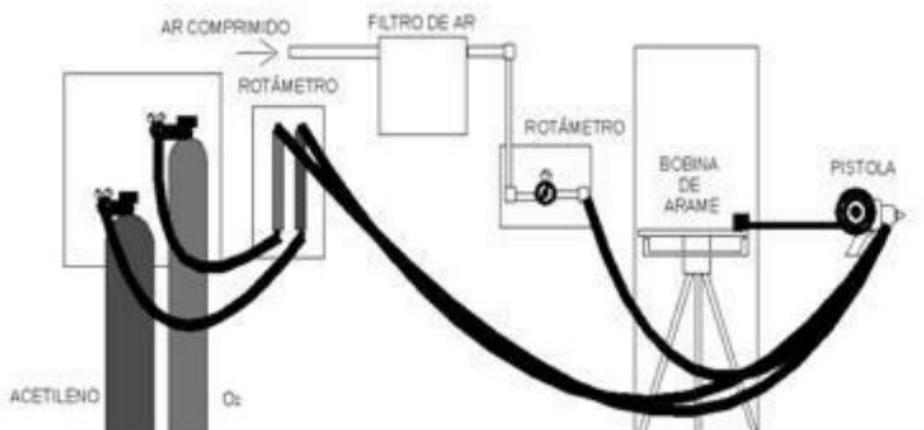
Figura 7 – Tocha de aspersão por chama convencional usando arame



Fonte: Lima e Trevisan (2007)

Uma representação esquemática dos equipamentos necessários para aspersão por chama convencional, que tanto o arame quanto o pó utilizam é mostrada na figura 8.

Figura 8 – Esquema dos equipamentos necessários na aspersão térmica por chama convencional



Fonte: Capra (2005)

2.2.1.2. Aspersão térmica utilizando pós

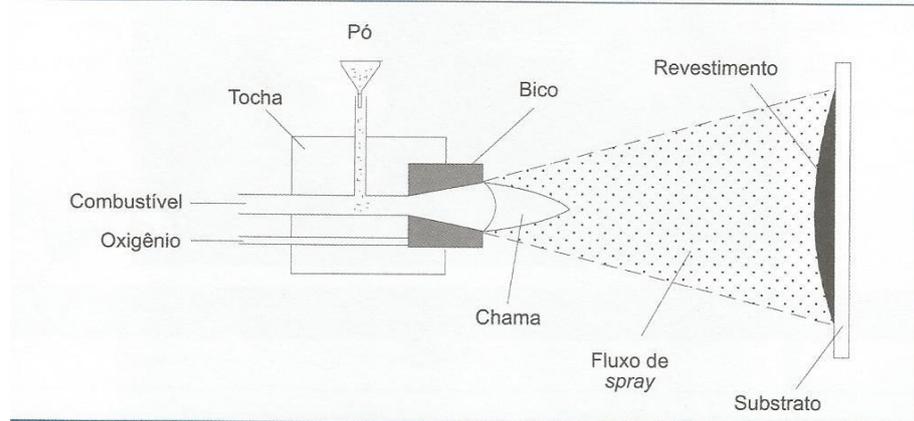
As tochas de aspersão térmica por chama convencional em forma de pó são mais leves e mais compactas que tochas para outros processos. Os revestimentos obtidos pelos materiais utilizados na forma de pó possuem em geral, menor resistência adesiva ao substrato, menor resistência coesiva as lamelas e maior porosidade, devido às menores temperaturas e velocidades das partículas (MARQUES, 2003).

As aplicações recomendadas para esse tipo de procedimento é quando se utilizam materiais chamados de autofluxantes, principalmente as ligas a base de níquel. Os materiais com essas ligas após serem depositados, devem ser aquecidos até sua fusão com o auxílio de maçaricos ou fornos até atingir sua densificação e aderência desejada (PARKER e KUTNER, 1991).

O pó para aspersão é armazenado num reservatório que pode fazer parte ou não da tocha e é transportado para a chama, normalmente, por gravidade. Esse pó poder ser um metal puro, uma liga, um compósito, uma cerâmica, um carboneto ou uma combinação destes. A taxa de alimentação varia de 50 g/min a 100 g/min e a taxa de fluxo de gás de transporte de 3 l/min a 5 l/min (LIMA e TREVISAN, 2007).

A figura 9 ilustra a seção transversal da tocha de aspersão térmica por chama de pó.

Figura 9 – Seção transversal da tocha por aspersão por chama de pó



Fonte: Lima e Trevisan (2007)

A figura 10 mostra como é a tocha de aspersão por chama usando pó.

Figura 10 – Tocha de aspersão por chama convencional usando pó



Fonte: Lima e Trevisan (2007)

O modelo de uma pistola utilizada na aspersão térmica por chama com pó é mostrada na figura 11.

Figura 11 – Pistola de aspersão térmica por chama de pó



Fonte: Novicki (2008)

2.2.1.3. Características e propriedades dos revestimentos por chama

A distância de aspersão, que significa a distância da extremidade da tocha e o substrato, varia de 120 mm a 250 mm, tendo um ângulo de trabalho de 90°, que pode ser alterado em função da forma do substrato. Esses revestimentos são aplicados numa atmosfera que, em geral, é o ar (PAWLOWSKI, 2008).

Os revestimentos aspergidos com liga de Ni-Al, na visão de Pawlowski (2008), podem alcançar resistência adesiva de 60 MPa ou até 70 MPa para ligas autofluxantes, sendo que para revestimentos cerâmicos, os valores estão na faixa de 15 MPa e 30 MPa para outros materiais. Para Lima e Trevisan (2007), a porosidade é de 10% a 20%, podendo ser obtidos valores zero para revestimentos autofluxantes e com relação às espessuras, os valores de aplicação variam de 0,1 mm a 2,5 mm.

2.2.2. Aquecimento por Detonação

O processo por detonação se difere dos outros métodos de aspersão por combustão, uma vez que utiliza uma energia de explosões vinda da mistura de oxigênio-acetileno para impulsionar o pó até o substrato. O revestimento depositado tem características de ser duro, denso e fortemente ligado ao substrato (MARQUES, 2003).

A temperatura de mistura da tocha de detonação supera os 3300 °C, enquanto a temperatura do substrato deve ser mantido abaixo de 150 °C. A espessura dos revestimentos fica entre 0,05 mm e 0,5 mm, com operação mecanizada ou remotamente controlada (MARQUES, 2003).

2.2.3. Aspersão Térmica a Arco Elétrico

A aspersão térmica a arco elétrico, ASP (Arc Spray Process) é também conhecido como arco arame. Este processo utiliza dois eletrodos consumíveis de arame, que são separados um do outro, onde avançam até o bico da pistola para se

encontrarem num ponto em que é formada uma névoa de gás atomizante (THORPE, 1993).

Uma diferença de potencial entre 18 volts e 40 volts é aplicada através dos arames, o qual é responsável por iniciar um arco elétrico que se torna a fonte de calor capaz de fundir as pontas dos arames eletrodos. Um jato de gás, composto normalmente por ar comprimido, é dirigido através da zona do arco, destacando o material fundido e projetando as partículas sobre um meio preparado (PARKER e KUTNER, 1991).

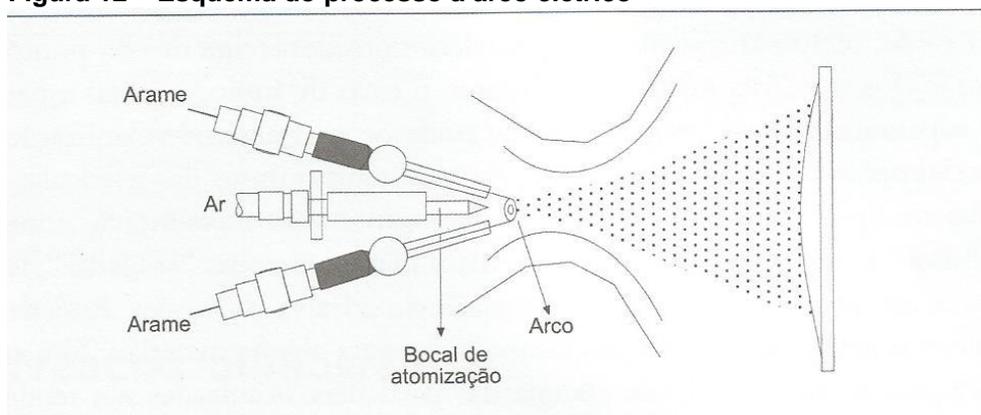
No procedimento de aspersão térmica, a oxidação é um fator prejudicial. Com a finalidade de reduzir a oxidação em aplicações especiais, a substituição do ar comprimido por gases inertes, como hélio e argônio, pode ser utilizada.

Segundo Marques (2003), a temperatura do arco varia de 4.000 °C a 6.000 °C, correspondendo a uma temperatura muito maior que o ponto de fusão do material aspergido. A ocorrência de algum superaquecimento e volatilização pode acontecer principalmente na aplicação de zinco e alumínio. Ainda para Marques (2003), áreas de reação química, difusão ou ambas, após o impacto com o substrato, podem ser produzidas pelas altas temperaturas das partículas.

Um fator limitante na utilização desse procedimento é o fato dos materiais aplicados terem de ser eletricamente condutores (LIMA e TREVISAN, 2007).

A figura 12 apresenta um esquema do processo a arco elétrico.

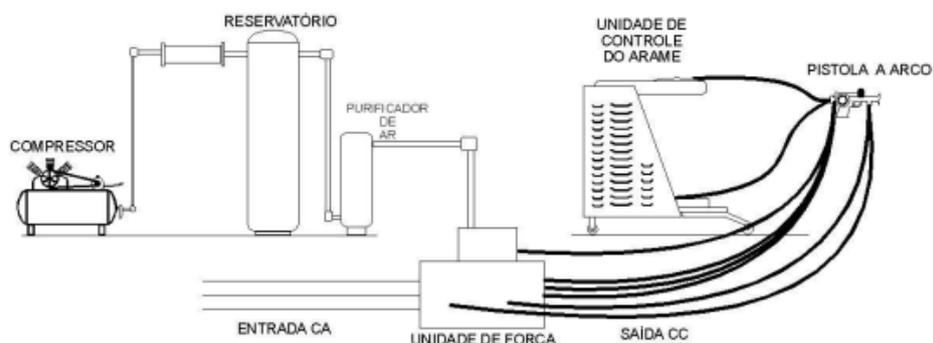
Figura 12 – Esquema do processo a arco elétrico



Fonte: Lima e Trevisan (2007)

Já a figura 13 mostra os componentes de um equipamento a arco elétrico.

Figura 13 – Representação dos componentes do equipamento a arco elétrico



Fonte: Novicki (2008)

2.3. PROPRIEDADES DOS REVESTIMENTOS POR ASPERSÃO TÉRMICA

As propriedades de um revestimento aspergido estão relacionadas diretamente com a adesão entre camada e substrato, e a coesão interna entre as partículas depositadas, influenciadas pela quantidade de defeitos presentes, como óxidos, poros e trincas. As propriedades mais relevantes para os revestimentos aspergidos são:

- Adesão;
- Porosidade;
- Oxidação.

2.3.1. Adesão

A adesão ou aderência pode ser considerada a propriedade mais importante para um bom revestimento. No procedimento de análise da aderência, geralmente são consideradas três mecanismos fundamentais, segundo a natureza das forças: mecânico; químico-metalúrgico; e físico.

O mecanismo de ancoramento mecânico acontece devido à contração ocorrida no resfriamento das partículas aquecidas e aceleradas contra o substrato, após conformação sofrida no impacto segundo a rugosidade da superfície (PAWLOWSKI, 1995).

O mecanismo químico-metalúrgico ocorre em função da natureza do material e do calor transferido pela partícula ao substrato, gerando um maior ou

menor grau de microsoldagem, difusão atômica com formação de soluções sólidas e compostos intermetálicos (PAWLOWSKI, 1995).

O mecanismo de aderência físico é responsável pela interação entre os átomos, os quais dependem da ação das forças de Van Der Waals, sendo realizados em superfícies limpas e com uma aproximação a nível atômico em torno de 5 μm (PAWLOWSKI, 1995).

O contato completo entre as lamelas e o substrato é impedido pela presença de óxidos, impurezas ou poros. Sendo assim, as regiões onde realmente ocorre o contato correspondem entre 20% e 30% da superfície das lamelas (HOUBEN, 1984). Segundo Krepski (1993), a adesão será ainda maior se essas regiões forem mais abrangentes e para que isso seja possível é necessária uma redução da quantidade de óxidos, através da utilização de gases inertes, assim como uma redução da pressão, variação da rugosidade e o uso de pré-aquecimento.

O material a ser revestido pode já estar contaminado com óxidos ou impurezas antes mesmo do revestimento, exigindo assim uma limpeza da superfície. A limpeza deve promover uma superfície livre de ferrugem, crostas de óxidos, graxas, óleos e umidade (MARANHO, 1996). Normalmente essa limpeza se dá através de jateamento abrasivo, o qual para a realização deve seguir alguns padrões visuais da norma sueca SIS 0559900 e da ABNT NBR 6405. Além de realizar a limpeza do substrato, o jateamento proporciona à superfície a rugosidade necessária para a deposição do revestimento (HOUBEN, 1984).

A avaliação da rugosidade é feita através dos parâmetros R_a (rugosidade média), R_y (altura pico-vale), R_z (altura das irregularidades de 10 pontos) e S_m (espaçamento médio das irregularidades), os quais apresentam valores recomendados pela norma ABNT NBR 6405 (ABNT, 1988). Em aplicações típicas, a rugosidade adequada é aquela que apresenta um R_a entre 2,5 μm a 13 μm , dependendo ainda da espessura do revestimento, que exige maiores rugosidades segundo a espessura (AWS, 1985).

2.3.2. Porosidade

A porosidade está presente nos revestimentos aspergidos e pode representar até 15% nos processos de chama convencional e arco elétrico, um valor bem acima se comparado com o processo HVOF. A porosidade depende de fatores

como a velocidade e a temperatura. No caso da velocidade, ela pode provocar uma elevada compactação das partículas ao se chocar contra o substrato, proporcionando uma melhora na coesão e diminuindo a porosidade (FREIRE, 2002). Já no caso da temperatura, ela deve ser suficiente para que a partícula se deforme no momento do choque com a superfície, possibilitando assim uma distribuição da área mais homogênea, mas por outro lado, se essa temperatura for excessiva, a partícula se espalhará além do necessário, podendo não aderir ao material e facilitar a oxidação (FREIRE, 2002).

Em procedimentos onde o material utilizado na aspersão se encontra na forma de pó, a morfologia é um fator contribuinte para a formação de poros, uma vez que o uso de pós sintetizados permite camadas menos porosas se comparadas com as camadas originárias de pós mais densos, os quais não atingem temperatura para que ocorra a deformação plástica. Dessa maneira, Schwetzke (2000) comenta que pós com granulometria superior a 45 μm favorecem a formação de poros.

O efeito gerado pela porosidade está na diferenciação das propriedades entre o material aspergido e a sua forma maciça, afetando a condutividade elétrica e térmica, assim como as propriedades mecânicas (SCHWETZKE e KREYE, 2000).

2.3.3. Oxidação

Nos processos de aspersão por chama convencional e arco elétrico, a presença de óxidos varia entre 10% a 30%. A presença dessa oxidação pode influenciar na formação de fases, microestrutura, propriedades e ainda comprometer o desempenho do revestimento (DESHPANDE, 2006).

Desde o aquecimento das partículas na pistola até a sua deposição no substrato, três mecanismos são responsáveis pela oxidação e dependem do grau de fusão das partículas aspergidas, da atmosfera ao redor e da velocidade de resfriamento. O primeiro mecanismo de oxidação que pode ocorrer nas partículas está durante o aquecimento gerado pela reação com o oxigênio proveniente do gás de arraste; o segundo mecanismo ocorre pela reação com a atmosfera vizinha durante a trajetória pistola-substrato que entra em contato com as partículas aquecidas; e o terceiro mecanismo é o resfriamento da superfície do revestimento recém formado, que recebe influencia direta da temperatura da base revestida, seja

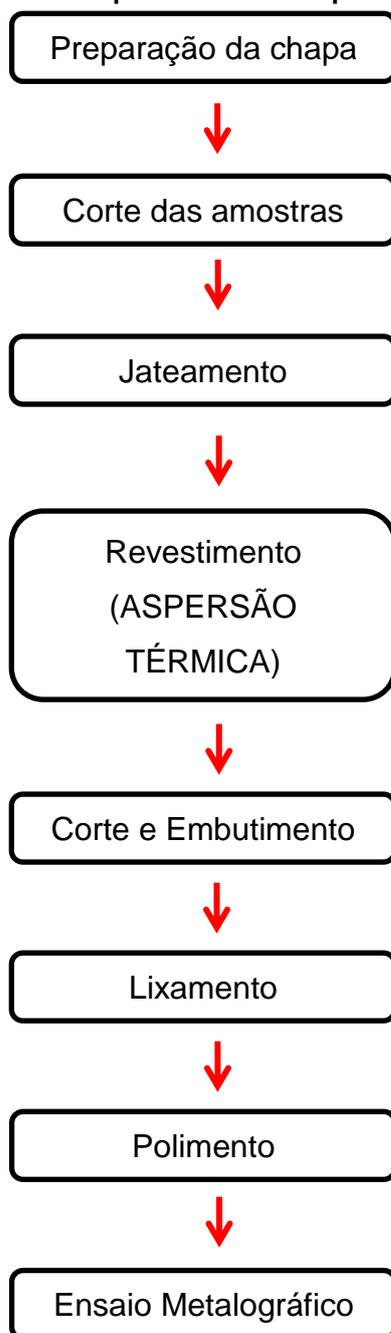
ela o substrato ou a camada anteriormente aspergida (SOBOLEV e GUILMANY, 1998).

O ar comprimido é preferencialmente utilizado nas operações de campo pelo seu baixo custo e praticidade. Como seu uso favorece os mecanismos de oxidação, outra opção seria a utilização de gases inertes, tais como o argônio e o hélio, que naturalmente permite um ganho na qualidade pela redução da presença de óxidos, que ocorre pela ausência de oxigênio no fluxo aspergido responsável pelo deslocamento das partículas; menor temperatura resultando na diminuição do tempo de solidificação; e formação de uma camada mais fina de óxidos durante o trajeto e após o impacto, favorecendo uma adesão mais eficiente (KAISE e MILLER, 1989).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esse capítulo irá abordar os materiais e metodologia utilizada na preparação das amostras e ensaios realizados. No fluxograma da figura 14 é possível observar as etapas realizadas para o procedimento experimental.

Figura 14 – Fluxograma das etapas adotadas no procedimento experimental



Fonte: Autoria própria

3.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

3.1.1. Preparação da Chapa

Para dar início ao trabalho foi adquirida uma chapa de alumínio com espessura de 5 mm. A chapa foi cortada em tiras, resultando num total de 24 peças, sendo 21 delas com dimensões de 35 mm de largura e 120 mm de comprimento, e as três restantes com dimensões de 35 mm de largura e 165 mm de comprimento. Esse procedimento de corte foi realizado no laboratório de Conformação da UTFPR- Câmpus Ponta Grossa, utilizando uma guilhotina da marca Clark, modelo TG 256, conforme a figura 15 a seguir.

Figura 15 – Guilhotina Clark TG 256



Fonte: A autoria própria

3.1.2. Jateamento

O processo de jateamento realizou-se no laboratório de Fundição da UTFPR- Câmpus Ponta Grossa. Esse procedimento foi realizado apenas numa das faces de todas as 24 peças, a fim de obter uma rugosidade necessária para uma melhor adesão do revestimento por aspensão térmica. O material utilizado para jateamento foi alumina branca com granulometria 36 Mesh.

3.1.3. Revestimento por Aspersão Térmica

Para o processo de revestimento das peças foi definida a utilização de dois materiais para revestimento e feita à divisão de 12 peças para cada material a ser depositado. Os materiais utilizados no revestimento foram: ALUMÍNIO ER 5356 e AÇO INOX 309 LS.

A tabela 2 apresenta como foi feita a subdivisão dos grupos.

Tabela 2 – Subdivisão dos grupos revestidos com cada material

ALUMÍNIO ER 5356		AÇO INOX 309 LS	
Grupo	Quantidade de peças	Grupo	Quantidade de peças
Al A	3	Inox E	3
Al B	3	Inox F	3
Al C	3	Inox G	3
Al D	3	Inox H	3

Fonte: Autoria própria

Para cada grupo foi definido uma pressão, na qual a sua tensão seria variada. As tabelas 3 e 4 a seguir mostram as pressões definidas com suas tensões variadas para cada material de revestimento.

Tabela 3 – Pressão e tensão para os grupos do material Alumínio ER 5356

ALUMÍNIO ER 5356		
Grupo	Pressão (kPa)	Tensão (V)
Al A	600	35,3
Al B	600	41,1
Al C	500	35,1
Al D	500	40,4

Fonte: Autoria própria

Tabela 4 – Pressão e tensão para os grupos do material Aço Inox 309 LS

AÇO INOX 309 LS		
Grupo	Pressão (kPa)	Tensão (V)
Inox E	500	35
Inox F	500	40,3
Inox G	600	40,3
Inox H	600	35

Fonte: Autoria própria

Essa etapa ocorreu nas dependências do laboratório de Soldagem da UTFPR– Câmpus Ponta Grossa. Foi utilizada a máquina da marca TBA, modelo Arc Spray 300, a qual se ajustava a pressão por meio de um manômetro e a tensão por meio de um seletor, sendo mais utilizado o seletor 3 e 5.

3.1.4. Corte e Embutimento

Terminado o processo de revestimento, o passo seguinte foi o corte de amostras de todas as peças revestidas para embutimento e preparação metalográfica. O procedimento de corte foi feito utilizando-se uma máquina de corte da marca Solotest, modelo Maxicut, mostrada na figura 16 a seguir.

Figura 16 – Máquina de corte (marca: Solotest / modelo: Maxicut) com proteção fechada



Fonte: Autoria própria

Para o processo de embutimento, utilizou-se uma embutidora da marca Buehler, modelo SimpliMet XPS1 e baquelite. A máquina embutidora funciona através de um aquecimento otimizado e fases de resfriamento com o objetivo de dar uma forma compacta as amostras e então facilitar o processo de lixamento, polimento e análise. O período de aquecimento foi definido em 5 minutos e o de resfriamento em 2 minutos e meio, com uma temperatura de 180 °C e pressão de compactação de 4200 psi. A figura 17 é referente à máquina embutidora utilizada e a figura 18 mostra um exemplo de amostras embutidas.

Figura 17 – Embutidora Buehler SimpliMet XPS1



Fonte: A autoria própria

Figura 18 – Exemplo de amostras embutidas



Fonte: A autoria própria

3.1.5. Lixamento

A etapa de lixamento tem como objetivo remover todo o material deformado na etapa de corte para que seja possível obter uma superfície plana e livre de deformações, a qual se deseja analisar microscopicamente. O lixamento das amostras foi feito de forma manual, utilizando a máquina Fortel PLF, como mostra a figura 19. Foram utilizados para esse procedimento lixas com granulometria de 320, 400, 600 e 1200 grãos/pol².

Figura 19 – Lixadeira e politriz Fortel PLF



Fonte: A autoria própria

3.1.6. Polimento

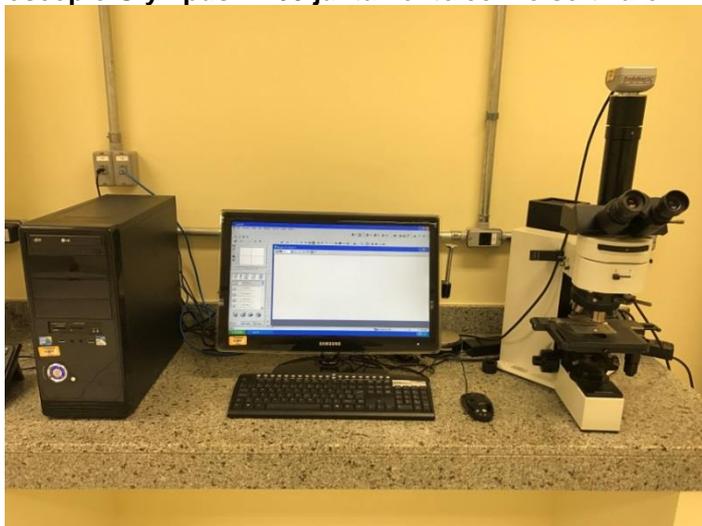
Nesse procedimento foram utilizadas suspensão de diamante de 3 e 1 micron, na politriz Buehler Beta.

Figura 20 – Politriz Buehler Beta

Fonte: Autoria própria

3.1.7. Microscopia Ótica

A microscopia ótica foi realizada com o intuito de analisar a espessura de camada, qualidade de revestimento, porosidades e inclusões de óxidos para cada material de revestimento e assim poder fazer uma comparação entre eles. Para esta etapa utilizou-se um microscópio Olympus, modelo BX 60, conforme foto da figura 21, com o auxílio do software AnalySIS©.

Figura 21 – Microscópio Olympus BX60 juntamente com o software AnalySIS©

Fonte: Autoria própria

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta sessão serão apresentados os resultados obtidos pela microscopia ótica.

4.1. ANÁLISE METALOGRÁFICA

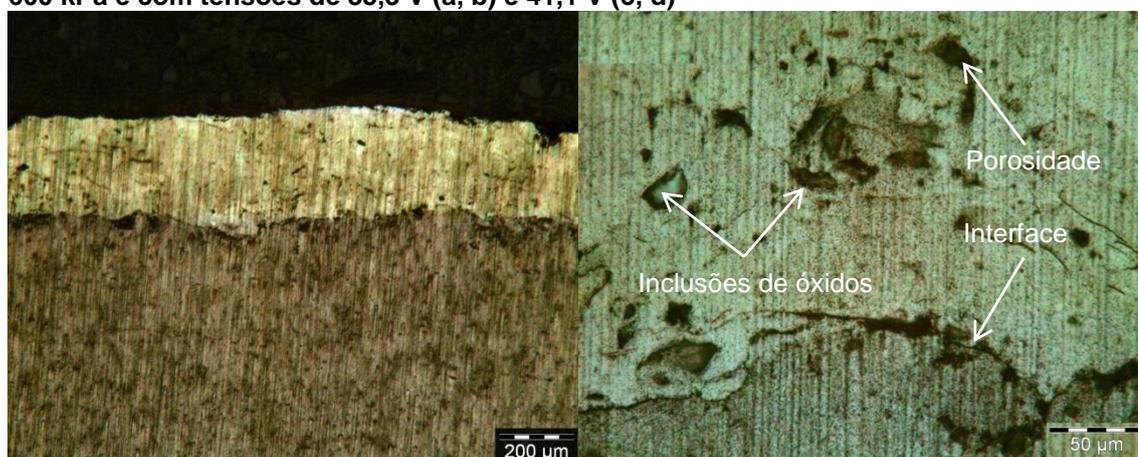
4.1.1. Substrato de Alumínio com Revestimento de Alumínio

As amostras revestidas com alumínio foram divididas conforme as suas pressões, seguindo a tabela 3.

a) Pressão de 600 kPa

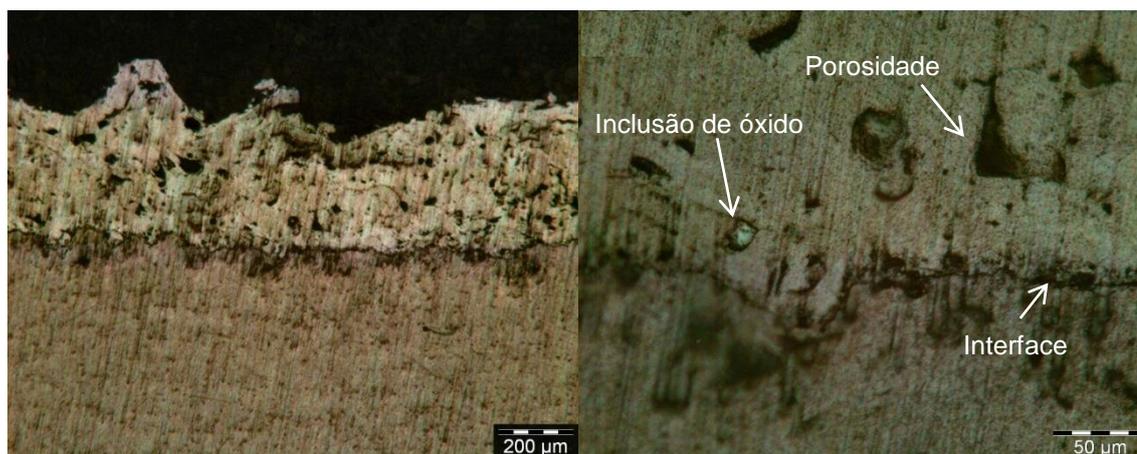
Conforme a tabela 3, as figuras 22(a) e 22(b) representam as microscopias relativas às amostras do grupo Al A obtidas com os parâmetros de pressão de 600 kPa e tensão de 35,3 volts. As figuras 22(c) e 22(d) representam as microscopias relativas às amostras do grupo Al B obtidas com os parâmetros de pressão de 600 kPa e tensão de 41,1 volts.

Figura 22 – Microscopias das amostras revestidas com alumínio obtidas com pressão de 600 kPa e com tensões de 35,3 V (a, b) e 41,1 V (c, d)



a) Amostra Al A ampliada 100x

b) Amostra Al A ampliada 500x



c) Amostra Al B ampliada 100x

d) Amostra Al B ampliada 500x

Fonte: Autoria própria

Os revestimentos obtidos com o parâmetro de pressão em 600 kPa apresentaram uma cobertura total em toda extensão da amostra aspergida. Para o mesmo parâmetro as amostras apresentaram regiões de interfaces distintas e não foi possível observar a presença de trincas.

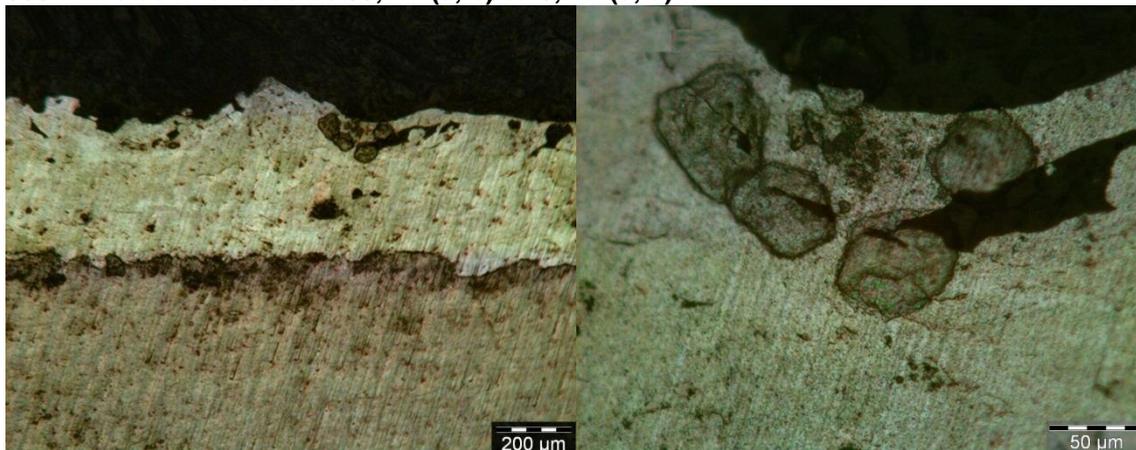
Ao analisar as variações do parâmetro de tensão, é possível observar que ambas as amostras revestidas apresentaram porosidades, tendo um acréscimo de porosidade na camada aspergida para a amostra com o maior valor de tensão aplicada no processo de aspersão.

As duas amostras apresentaram a formação de óxidos, característica das camadas aspergidas.

b) Pressão de 500 kPa

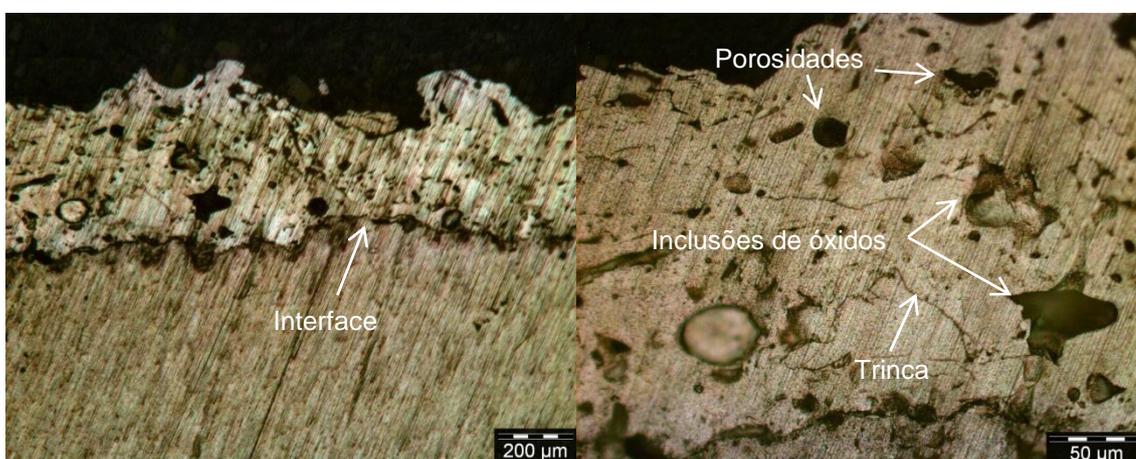
Conforme a tabela 3, as figuras 23(a) e 23(b) representam as microscopias relativas às amostras do grupo Al C obtidas com os parâmetros de pressão de 500 kPa e tensão de 35,1 volts. As figuras 23(c) e 23(d) representam as microscopias relativas às amostras do grupo Al D obtidas com os parâmetros de pressão de 500 kPa e tensão de 40,4 volts.

Figura 23 – Microscopias das amostras revestidas com alumínio obtidas com pressão de 500 kPa e com tensões de 35,1 V (a, b) e 40,4 V (c, d)



a) Amostra Al C ampliada 100x

b) Amostra Al C ampliada 500x



c) Amostra Al D ampliada 100x

d) Amostra Al D ampliada 500x

Fonte: Autoria própria

Os revestimentos obtidos com o parâmetro de pressão em 500 kPa apresentaram uma cobertura total em toda extensão da amostra aspergida. Para o mesmo parâmetro as amostras apresentaram regiões de interfaces distintas.

Ao analisar as variações do parâmetro de tensão, é possível observar que a amostra revestida com o maior valor de tensão apresenta regiões com trinca. Ambas as camadas aspergidas contém porosidades, ficando bem evidente que a camada aspergida com o maior valor de tensão possui uma quantidade maior de porosidade.

A formação de óxidos também ocorre em ambas às amostras, tendo a amostra com maior valor de tensão regiões com mais inclusões.

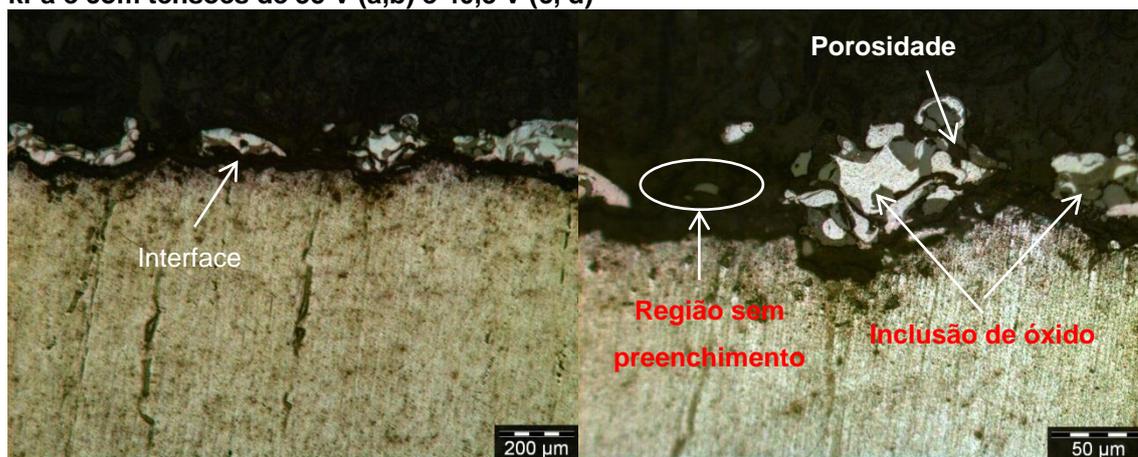
4.1.2. Substrato de Alumínio com Revestimento de Inox

As amostras revestidas com inox foram divididas conforme as suas pressões, seguindo a tabela 4.

a) Pressão de 500 kPa

Conforme a tabela 4, as figuras 24(a) e 24(b) representam as microscopias relativas às amostras do grupo Inox E obtidas com os parâmetros de pressão de 500 kPa e tensão de 35 volts. As figuras 24(c) e 24(d) representam as microscopias relativas às amostras do grupo Inox F obtidas com os parâmetros de pressão de 500 kPa e tensão de 40,3 volts.

Figura 24 – Microscopias das amostras revestidas com inox obtidas com pressão de 500 kPa e com tensões de 35 V (a,b) e 40,3 V (c, d)



a) Amostra Inox E ampliada 100x

b) Amostra Inox E ampliada 500x



c) Amostra Inox F ampliada 100x

d) Amostra Inox F ampliada 500x

Fonte: Autoria própria

Os revestimentos obtidos com o parâmetro de pressão em 500 kPa apresentaram uma cobertura intermitente em toda a extensão da camada aspergida, com muitas regiões descobertas. Para o mesmo parâmetro, as amostras apresentaram interfaces distintas, além de alguns pontos de porosidades.

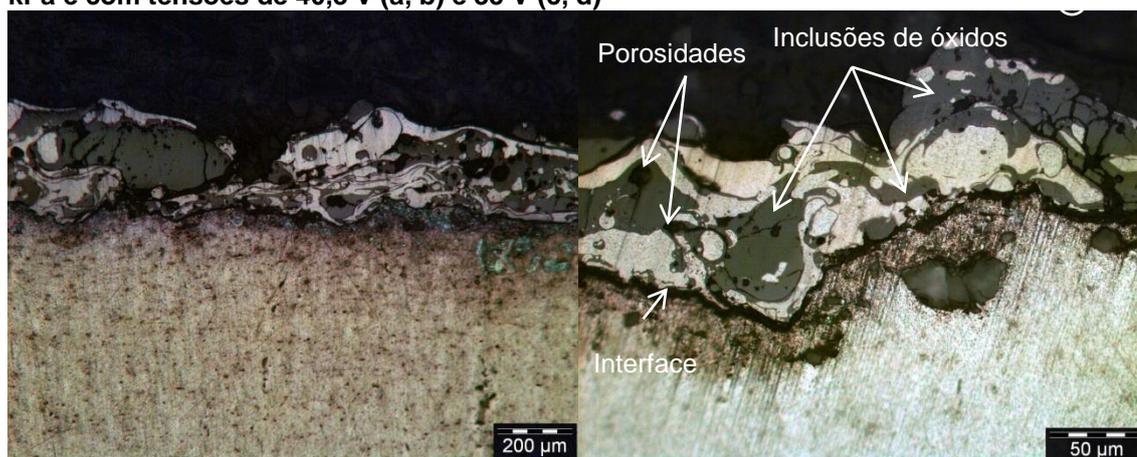
Ao analisar as variações do parâmetro de tensão, pôde-se observar uma maior regularidade de cobertura da camada aspergida para um maior valor de tensão aplicada durante o processo de aspersão. Nota-se nas camadas aspergidas com maior valor de tensão uma interface mais espessa.

Em ambas as amostras aspergidas são possíveis observar a formação de óxidos nas camadas.

b) Pressão de 600 kPa

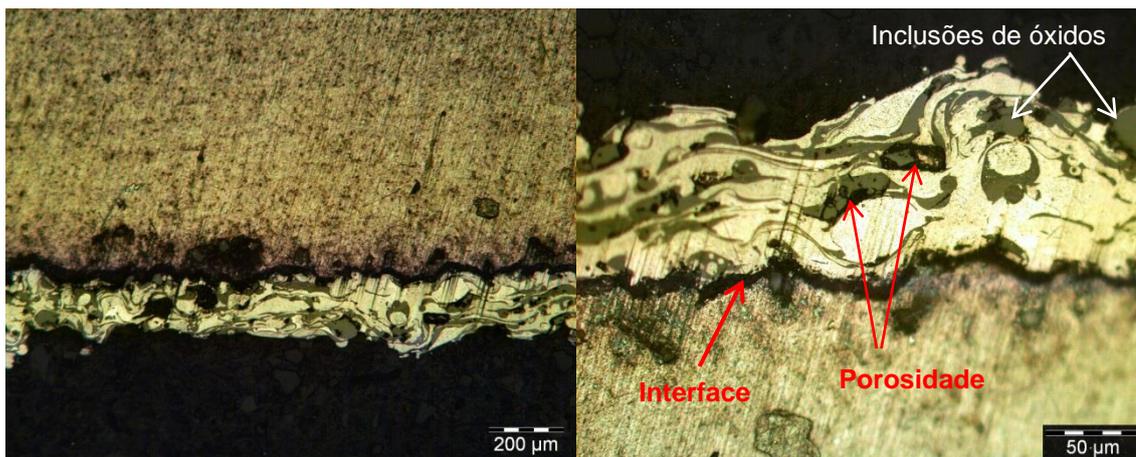
Conforme a tabela 4, as figuras 25(a) e 25(b) representam as microscopias relativas às amostras do grupo Inox G obtidas com os parâmetros de pressão de 600 kPa e tensão de 40,3 volts. As figuras 25(c) e 25(d) representam as microscopias relativas às amostras do grupo Inox H obtidas com os parâmetros de pressão de 600 kPa e tensão de 35 volts.

Figura 25 – Microscopias das amostras revestidas com inox obtidas com pressão de 600 kPa e com tensões de 40,3 V (a, b) e 35 V (c, d)



a) Amostra Inox G ampliada 100x

b) Amostra InoxG ampliada 500x



c) Amostra Inox H ampliada 100x

d) Amostra InoxH ampliada 500x

Fonte: Autoria própria

Os revestimentos obtidos com o parâmetro de pressão em 600 kPa apresentaram uma cobertura completa em toda extensão da camada aspergida, não apresentando regiões descobertas. Para o mesmo parâmetro as amostras revestidas apresentaram regiões de interface mais fina. Alguns pontos de porosidades também são vistos nas camadas aspergidas.

Ao analisar as variações do parâmetro de tensão, não foi possível observar mudanças significantes nas camadas aspergidas, mostrando que ambas as amostras se comportaram de forma semelhante.

Para as duas amostras revestidas, a formação de óxidos se mostrou presente.

4.2. MEDIÇÕES DE ESPESSURA DE CAMADA

4.2.1. Substrato de Alumínio com Revestimento de Alumínio

Para obter as medições de espessura das camadas das amostras revestidas com alumínio, foi feita a divisão conforme o parâmetro de pressão, seguindo a tabela 3.

a) Pressão de 600 kPa

A tabela 5 apresenta os valores de espessura de camada de revestimento dos grupos AI A e AI B com a pressão de 600 kPa e as tensões de 35,3 volts e 41,1 volts.

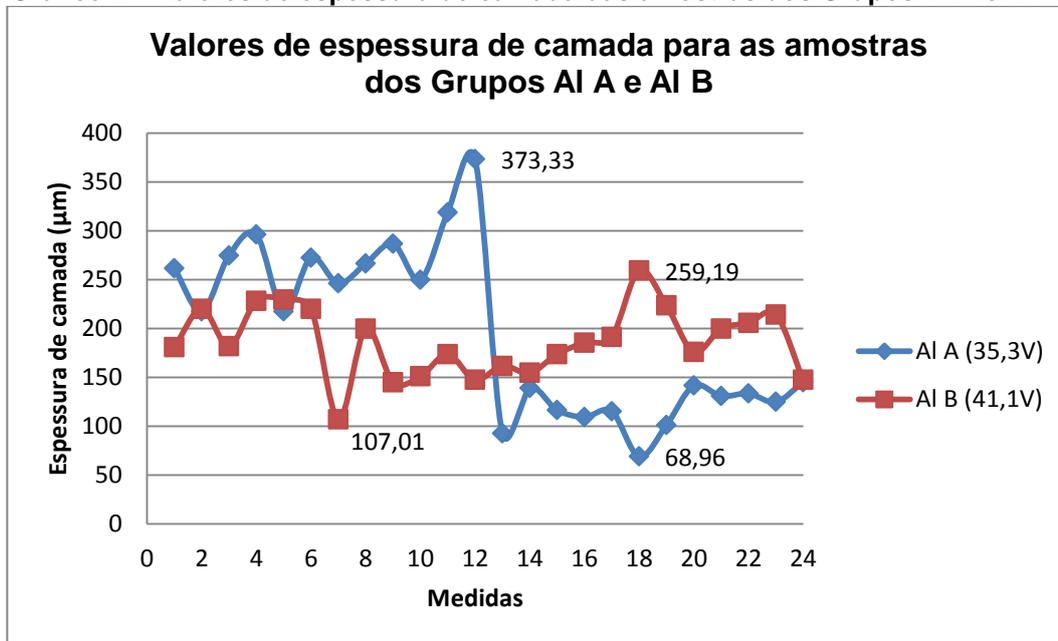
Tabela 5 – Valores de espessura de camada das amostras AI A1 e AI A2 com tensão de 35,3 V e amostras AI B1 e AI B2 com tensão de 41,1 V

AMOSTRA	VALORES (µm)	AMOSTRA	VALORES (µm)
AI A1	261,57	AI B1	180,72
	217,58		219,96
	274,65		181,91
	296,05		228,28
	217,58		229,47
	272,27		219,96
	246,11		107,01
	266,33		199,75
	286,54		145,05
	249,68		151
	318,64		173,59
373,33	147,43		
	MÉDIA 273,36		MÉDIA 182,01
	DESV. P 43,12		DESV. P 39,09
AI A2	92,74	AI B2	161,7
	139,11		154,56
	116,52		173,59
	109,38		185,48
	115,05		191,42
	68,96		259,19
	101,06		223,52
	141,49		175,97
	130,79		199,75
	133,4		205,69
	124,84		214,01
145,05	147,43		
	MÉDIA 118,20		MÉDIA 191,03
	DESV. P 22,55		DESV. P 31,87

Fonte: Autoria própria

Com os valores das regiões medidas, o gráfico 1 demonstra, de uma forma geral, como foi o comportamento dos revestimentos.

Gráfico 1 – Valores de espessura de camada das amostras dos Grupos AI A e AI B



Fonte: Autoria própria

As amostras obtidas pelos parâmetros do Grupo AI A, tiveram suas espessuras bem diferentes uma da outra, porém é possível observar que ambas as amostras tiveram um comportamento de cobertura uniforme em toda a extensão da camada aspergida.

As amostras obtidas pelos parâmetros do Grupo AI B tiveram as médias de espessuras mais próximas uma da outra.

Ao analisar as variações do parâmetro de tensão, é possível observar um desvio menor nos valores da espessura para as camadas com o menor valor de tensão, podendo assim dizer que são camadas mais homogêneas. Não é possível afirmar qual das tensões apresentou uma espessura mais grossa ou fina, pelo fato das amostras do Grupo AI A terem valores bem diferentes.

b) Pressão de 500 kPa

A tabela 6 apresenta os valores de espessura de camada de revestimento dos grupos AI C e AI D com a pressão de 500 kPa e as tensões de 35,1 volts e 40,4 volts.

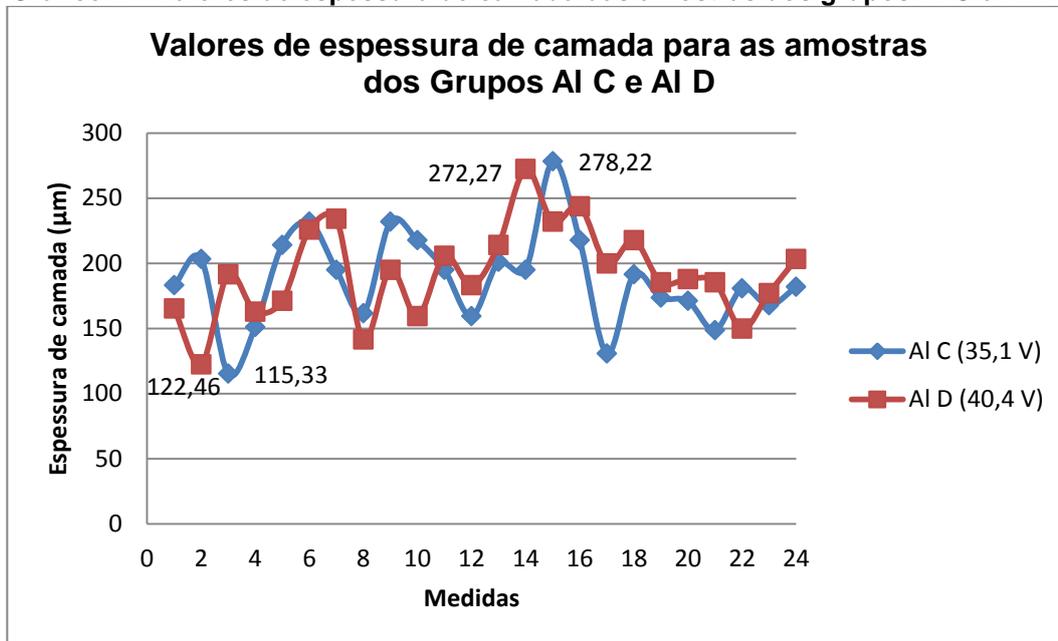
Tabela 6 - Valores de espessura de camada das amostras AI C1 e AI C2 com tensão de 35,1 V e amostras AI D1 e AI D2 com tensão de 40,4 V.

AMOSTRA	VALORES (μm)	AMOSTRA	VALORES (μm)
AI C1	183,1	AI D1	165,27
	203,31		122,46
	115,33		191,42
	151		162,89
	214,01		171,21
	231,85		225,9
	194,99		234,22
	161,7		141,49
	231,85		194,99
	217,58		159,32
	194,99		205,69
	159,32		183,1
	MÉDIA		MÉDIA
	188,25		179,83
	DESV. P		DESV. P
	35,57		32,86
AI C2	200,93	AI D2	214,01
	194,99		272,27
	278,22		231,85
	217,58		243,74
	130,79		199,75
	191,42		217,58
	173,59		185,48
	171,21		187,86
	148,62		185,48
	180,72		149,81
	167,64		177,15
	181,91		203,31
	MÉDIA		MÉDIA
	186,47		205,69
	DESV. P		DESV. P
	36,97		32,88

Fonte: Autoria própria.

Com os valores das regiões medidas, o gráfico 2 demonstra, de uma forma geral, como foi o comportamento dos revestimentos.

Gráfico 2 – Valores de espessura de camada das amostras dos grupos AI C e AI D



Fonte: Autoria própria

As amostras obtidas pelos parâmetros do Grupo AI C tiveram os valores das médias muito próximas uma da outra, conforme a tabela 6, porém apresentou maiores desvios nos valores da espessura, significando que as amostras com menor valor de tensão obtiveram uma cobertura menos homogênea em toda extensão das camadas aspergidas.

As amostras obtidas pelos parâmetros do Grupo AI D tiveram os valores das médias um pouco diferentes, porém em toda a extensão da camada aspergida apresentou uma cobertura com menor variação, mostrando um comportamento da camada mais homogênea.

Ao analisar as variações do parâmetro de tensão, não é possível observar uma diferença significativa entre as espessuras de cada grupo, mas é possível verificar que as amostras com o maior valor de tensão apresentaram uma melhor homogeneidade de cobertura em toda extensão das camadas aspergidas.

4.2.2. Substrato de Alumínio com Revestimento de Inox

Para obter as medições de espessura das camadas das amostras revestidas com inox, foi feita a divisão conforme o parâmetro de pressão, seguindo a tabela 4.

a) Pressão de 500 kPa

A tabela 7 apresenta os valores de espessura de camada de revestimento dos grupos Inox E e Inox F com a pressão de 500 kPa e as tensões de 35 volts e 40,3 volts.

Tabela 7 - Valores de espessura de camada das amostras Inox E1 e Inox E2 com tensão de 35 V e amostras Inox F1 e Inox F2 com tensão de 40,3 V

(continua)

AMOSTRA	VALORES (μm)	AMOSTRA	VALORES (μm)
	76,09		72,53
	107,01		72,53
	43,99		74,9
	92,74		122,46
	121,27		52,31
	51,13		145,05
Inox E1	127,22	Inox F1	90,36
	83,23		130,79
	40,42		72,53
	102,25		52,31
	58,26		102,25
	87,98		63,01
	MÉDIA		MÉDIA
	82,63		87,59
	DESV. P		DESV. P
	29,38		30,96

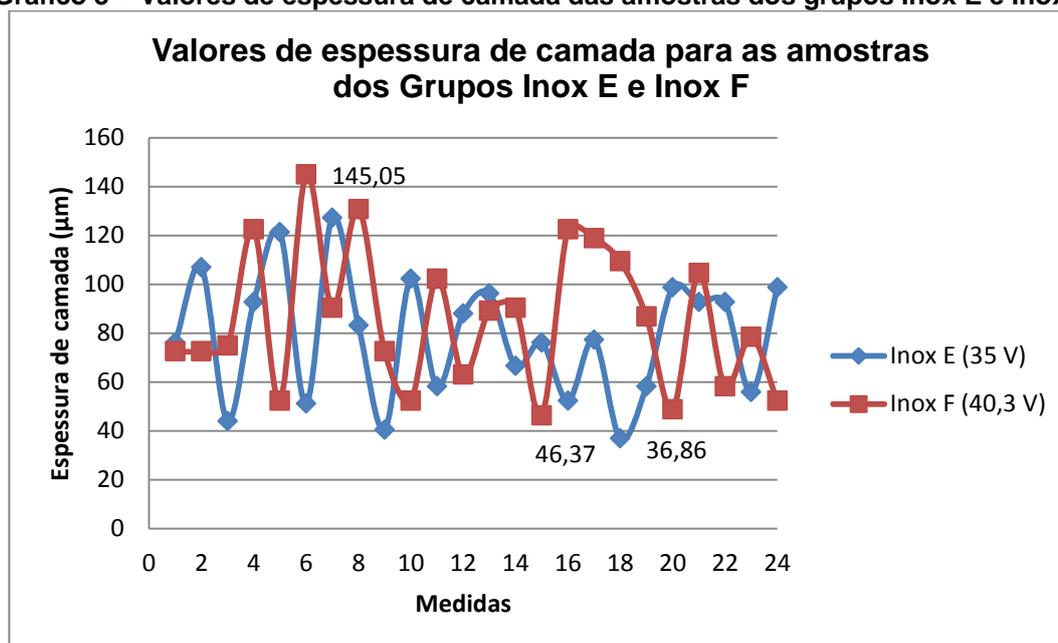
Tabela 8 - Valores de espessura de camada das amostras Inox E1 e Inox E2 com tensão de 35 V e amostras Inox F1 e Inox F2 com tensão de 40,3 V

(conclusão)			
AMOSTRA	VALORES (μm)	AMOSTRA	VALORES (μm)
Inox E2	96,31	Inox F2	89,17
	66,58		90,36
	76,09		46,37
	52,31		122,46
	77,28		118,9
	36,86		109,38
	58,26		86,79
	98,68		48,75
	92,74		104,63
	92,74		58,26
55,88	78,47		
98,68	52,31		
	MÉDIA 75,20		MÉDIA
	DESV. P 21,10		DESV. P

Fonte: Autoria própria

Com os valores das regiões medidas, o gráfico 3 demonstra, de uma forma geral, como foi o comportamento dos revestimentos.

Gráfico 3 – Valores de espessura de camada das amostras dos grupos Inox E e Inox F



Fonte: Autoria própria

As amostras obtidas pelos parâmetros do Grupo Inox E tiveram os valores de espessura bem baixos, assim como aconteceu nas amostras obtidas pelos parâmetros do Grupo Inox F.

Ao analisar as variações do parâmetro de tensão, é possível observar uma menor variação nos valores de espessura para as camadas revestidas com o parâmetro de tensão em 35 volts, caracterizando esse grupo com uma camada aspergida mais homogênea.

As médias das espessuras para ambas as amostras foram muito próximas.

b) Pressão de 600 kPa

A tabela 8 apresenta os valores de espessura de camada de revestimento dos grupos Inox G e Inox H com a pressão de 600 kPa e as tensões de 40,3 volts e 35 volts.

Tabela 9 – Valores de espessura de camada das amostras Inox G1 e Inox G2 com tensão de 40,3 V e amostras Inox H1 e Inox H2 com tensão de 35 V

(continua)

AMOSTRA	VALORES (μm)	AMOSTRA	VALORES (μm)
Inox G1	142,68	Inox H1	86,79
	87,98		70,15
	86,79		80,85
	80,85		98,68
	139,11		118,9
	71,34		54,69
	90,36		84,42
	127,22		102,25
	101,06		40,42
	78,47		72,53
72,53	78,47		
84,42	102,25		
MÉDIA	96,90	MÉDIA	82,53
DESV. P	25,30	DESV. P	21,75

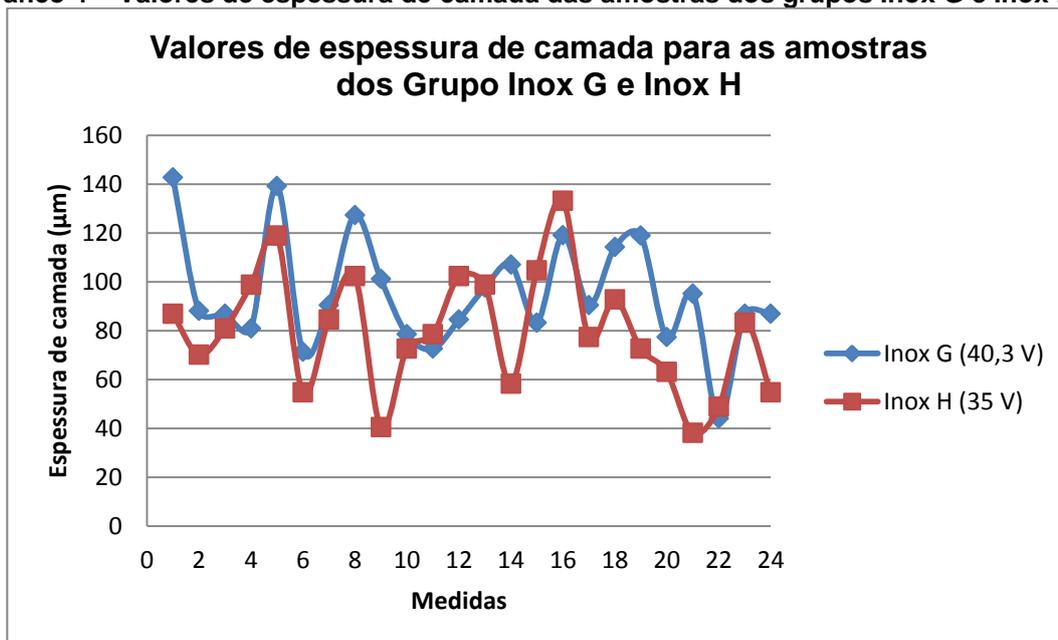
Tabela 10 – Valores de espessura de camada das amostras Inox G1 e Inox G2 com tensão de 40,3 V e amostras Inox H1 e Inox H2 com tensão de 35 V

(conclusão)			
AMOSTRA	VALORES (μm)	AMOSTRA	VALORES (μm)
Inox G2	97,49	Inox H2	98,68
	107,01		58,26
	83,23		104,63
	118,96		133,16
	90,36		77,28
	114,14		92,74
	118,9		72,53
	77,28		63,01
	95,12		38,05
	43,99		48,75
	86,79		83,23
86,79	54,69		
	MÉDIA 93,34		MÉDIA
	DESV. P 20,98		DESV. P

Fonte: Autoria própria

Com os valores das regiões medidas, o gráfico 4 demonstra, de uma forma geral, como foi o comportamento dos revestimentos.

Gráfico 4 – Valores de espessura de camada das amostras dos grupos Inox G e Inox H



Fonte: Autoria própria

As amostras obtidas pelos parâmetros do Grupo Inox G tiveram os valores de espessura menores, assim como aconteceu nas amostras obtidas pelos parâmetros do Grupo Inox H.

Conforme a tabela 8 verifica-se para as amostras revestidas com os parâmetros do Grupo Inox G um valor médio de espessura muito próximo um do outro, sendo possível ainda observar um menor desvio nas medições.

Ao analisar as variações do parâmetro de tensão, é possível observar que as camadas aspergidas com o menor valor de tensão variou menos em relação as camadas aspergidas com o maior valor de tensão, tornando as amostras do Grupo Inox G mais homogêneas.

É possível observar um pequeno acréscimo na espessura das amostras do Grupo Inox G se comparado com os valores dos outros grupos e parâmetros.

5. CONCLUSÃO

- Amostras depositadas com alumínio foi observado uma relação entre tensão e porosidade.
- Para pressão de 600 kPa foi observado uma espessura de camada mais homogênea para amostras com menor valor de tensão.
- Para pressão de 500 kPa foi observado uma espessura de camada mais homogenia e presença de trincas para amostras com maior valor de tensão.
- Amostras depositadas com aço inoxidável observou-se uma grande diferença no valor da espessura da camada.
- Para ambos os parâmetros foi observado à presença de inclusões de óxidos.
- Para o parâmetro de tensão não houve muitas diferenças entre as amostras. A diferença ocorreu com o parâmetro de pressão, sendo que amostras revestidas com 500 kPa apresentaram regiões descobertas e interface bem espessa.
- Com parâmetros definidos e resultados gerados, a escolha do aço inoxidável para material de revestimento não foi satisfatória, apresentando camada muito fina, regiões descobertas e muitas inclusões de óxidos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREUCCI, R. Líquidos penetrantes. **ABENDI**: Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção, 2013. Disponível em: <http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/biblioteca/LP-2013_pdf%20substituir.pdf>. Acesso em: 09 ago. 2016.

ASM METALS HANDBOOK. **Nondestructive evaluation and quality control**. 9a. ed. United States of America: ASM Int., v. 17, 1989.

AWS, A. W. S. **Thermal Spraying**: practice, theory and applications. Miami, FL, USA: [s.n.], 1985.

CALLISTER, W. D. J. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7. ed. São Paulo: ABM , 1996.

COSTA E SILVA, A. L.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. Sumaré: Eletrometal Metais Especiais, 1988.

DIAMOND, J. **Armas, germes e aço - os destinos das sociedades humanas**. Rio de Janeiro: Record, 2007.

DORFMAN, M. R. **Thermal Spray**. [S.l.]: Advanced Materials & Processes, v. 160, 2002.

GARCIA, A. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro: LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2000.

HELLIER, C. J. **Handbook of Nondestructive evaluation**. United States of America: McGraw-Hill Companies, 2003.

HOUBEN, J. M. **Future developments in thermal spraying**. OH: John Wiley & Sons, 1984.

INFOSOLDA. Ensaio não destrutivos: Líquidos penetrantes. **Infosolda**, S/Data. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/ensaio-nao-destrutivos-e-mecanicos/217-ensaio-nao-destrutivo-liquidos-penetrantes.html>>. Acesso em: 09 ago. 2016.

KAISE, J. J.; MILLER, R. A. **Inert gas improve arc-sprayed coatings**. [S.l.]: Advanced Materials and Processes, v. 136, 1989.

KREPSKI, R. P. **Thermal spray coating applications in the chemical process industries**. St. Louis: Materials Technology Institute, 1993.

LIMA, C. C.; TREVISAN, R. **Aspersão Térmica: Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2007.

MARQUES, P. V. Aspersão térmica. **Infosolda**, 2003. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/artigos/prosol05.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2016.

MIX, P. E. **Introduction to Nondestructive Testing: A Training Guide**. 2. ed. New Jersey: Wiley-Interscience, 2005.

NEWELL, J. **Fundamentos da moderna engenharia e ciência dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia**. São Paulo: Editora Hemus, 2007.

PARKER, D. W.; KUTNER, E. L. **HVOF spray technology poised for growth**. [S.I.]: *Advanced Materials and Processes*, v. 139, 1991.

PAWLOWSKI, L. **The science and engineering of thermal spray coatings**. New York: John Wiley & Sons, 1995.

PAWLOWSKI, L. **The science and engineering of thermal spray coatings**. New York: John Wiley & Sons, 2008.

SAMPSON, E. R. **Thermal spray coatings for corrosion protection: an overview**. [S.I.]: *Coatings & Linings*, v. 36, 1997.

SCHWETZKE, R.; KREYE, H. **High velocity oxy-fuel spraying of tungsten carbide: based coatings**. [S.I.]: DSV, 2000.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos da engenharia e ciência dos materiais**. 5. ed. Rio Grande do Sul: AMGH Editora LTDA, 2012.

SOBOLEV, V. V.; GUILMANY, J. M. **Oxidation of coatings in thermal spraying**. [S.I.]: *Materials Letters*, v. 37, 1998.

SOUZA, S. A. **Ensaaios mecânicos de materiais metálicos**. 5. ed. São Paulo: Editora Blucher, 1982.

SOUZA, S. A. D. **Composição química dos aços**. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 1989.

SUGANUMA, K.; MYIAMOTO, Y.; KOIZUMI, M. **Joining of ceramic and metals**. [S.I.]: *Annual Review Material Science*, v. 18, 1988.

THORPE, M. L. **Thermal spray: industry in transition**. [S.I.]: *Advanced Materials & Processes*, v. 5, 1993.

TUCKER, R. C. **Thermal spray coatings**. [S.I.]: in *ASM Handbook - Surface Engineering*, v. 5, 1993.

WINKLER, M. F.; PARKER, D. W. **Greener meaner diesels sport thermal barrier coatings.** [S.I.]: Advanced Materials and Processes, 1992.