

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

**NATHALIA RADECK MALAQUIAS
WEVERTTON MAYER**

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE ESPESSURA E POROSIDADE SUPERFICIAL
DA CAMADA DE REVESTIMENTO DE ALUMÍNIO EM SUBSTRATO DE AÇO
POR ASPERSÃO VIA ARCO ELÉTRICO COM CONTROLE
AUTOMATIZADO E MANUAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PONTA GROSSA
2018**

**NATHALIA RADECK MALAQUIAS
WEVERTTON MAYER**

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE ESPESSURA E POROSIDADE SUPERFICIAL
DA CAMADA DE REVESTIMENTO DE ALUMÍNIO EM SUBSTRATO DE AÇO
POR ASPERSÃO VIA ARCO ELÉTRICO COM CONTROLE
AUTOMATIZADO E MANUAL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica do
Departamento Acadêmico de
Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná/
Campus Ponta Grossa.

Orientador: Prof^a. Sandra Mara
Kaminski Tramontin.

**PONTA GROSSA
2018**



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE ESPESSURA E POROSIDADE SUPERFICIAL DA CAMADA DE REVESTIMENTO DE ALUMÍNIO EM SUBSTRATO DE AÇO POR ASPERSÃO VIA ARCO ELÉTRICO COM CONTROLE AUTOMATIZADO E MANUAL

por

NATHALIA RADECK MALAQUIAS E WEVERTTON MAYER

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 6 de dezembro de 2018 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

Profa. Ma. Heliety Rodrigues Borges Barreto
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de Carvalho
Coordenador do Curso

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus que nos concedeu a vida e nos fez chegar ao presente momento com saúde e a sorte de sermos quem somos.

Aos nossos Pais, Amarildo Malaquias e Josmara A. R. Malaquias e Walter Z. Mayer e Raimunda dos Anjos Mayer que nos apoiaram incondicionalmente e nos proporcionaram essa grandiosa oportunidade, sem os esforços e o amor deles nada disso seria possível. A nossa família que em conjunto auxiliou em todo o apoio fornecendo a base familiar.

Aos nossos Professores, grandes mestres da nossa nação que nos transmitiram seus conhecimentos e nos ensinaram o valor dele e como buscá-lo ininterruptamente. Em especial Professora Sandra que nos deu todo seu suporte e paciência em conjunto com o professor Anderson pela parte técnica.

Aos nossos amigos que se tornaram nossa segunda família, compartilhando momentos de alegria e tristeza.

Ao nosso time de Handebol da A.A.A.E. XV de Outubro que nos fez aprender a trabalhar em equipe lidando com as emoções das vitórias e das derrotas.

RESUMO

MALAQUIAS, Nathalia R., MAYER, Wevertton. **Análise da variação de espessura e porosidade superficial da camada de revestimento de alumínio em substrato de aço por aspersão via arco elétrico com controle automatizado e manual.** 2018. 37 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

A aplicação de revestimento através de aspersão térmica visa depositar material sobre substrato para obter melhores propriedades mecânicas como desgaste, corrosão, etc. Neste trabalho foram utilizados dois métodos, sendo aplicação manual e aplicação automatizada via robô, para aplicação de aspersão térmica por arco elétrico possuindo um arco elétrico com fonte de combustão do material em formato de arame fundindo-o por uma diferença de potencial e acelerado pelo ar comprimido sendo o gás de arraste, atingindo altas temperaturas, altas oxidações devido ao contato com ar comprimido, podendo conter poros.

O propósito da pesquisa é analisar e comparar os dois métodos utilizados, aplicação manual e por meio de controle robotizado de parâmetros, atestando sua micrografia e microdureza.

O material de revestimento utilizado foi arame de alumínio aspergido em substratos de aço SAE 1020. Tamanho de espessura de camada, porosidade, visualização da região de interseção aço-alumínio mostraram que o controle dos parâmetros permite um revestimento mais homogêneo e diminuição na quantidade poros e influencia na espessura de camada.

De maneira geral, os resultados indicam à técnica de aplicação do operador manual, à distância pistola-substrato, os controles do robô, a forma de preparação da superfície do substrato afeta diretamente no revestimento aspergido.

A elevação da espessura da camada revestida eleva em leve aumento da microdureza.

Palavras chaves: Aspersão térmica, arco elétrico, alumínio, microestrutura, microdureza.

ABSTRACT

MALAQUIAS, Nathalia R., MAYER, Weverton. **Analysis of the thickness variation and surface porosity of the aluminum coating layer on steel substrate by electric arc spray with automated and manual control.** 2018. 37 p. Work of Conclusion Course (Graduation in Mechanical Engineering). Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2018.

The application of coating by thermal spraying aims at depositing material on substrate to obtain better mechanical properties like wear, corrosion, etc. In this work two methods were used, being manual application and automated application via robot, for the application of electric arc thermal spray having an electric arc with source of combustion of the material in wire format, melting it by a potential difference and accelerated by the air compressed gas being the transport gas, reaching high temperatures, high oxidations due to contact with compressed air, and may contain pores.

The purpose of the research is to analyze and compare the two methods used, manual application and through robotic control of parameters, attesting its micrograph and microhardness.

The coating material used was aluminum wire sprinkled on SAE 1020 steel substrates. Layer thickness size, porosity, visualization of the steel-aluminum intersection region showed that the control of the parameters allows for a more homogeneous coating and a decrease in the amount of pores and influence on layer thickness size.

In general, the results indicate to the technique of applying the manual operator, the gun-substrate distance, the controls of the robot, the way of preparation of the surface of the substrate directly affects the spray coating

The increase in the thickness of the coated layer increases the microhardness slightly.

Keywords: Thermal sprinkler, electric arc, aluminum, microstructure, microhardness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Micrografia de pós utilizado sem aspersão térmica.	10
Figura 2 - Seção transversal de uma superfície aspergida termicamente.....	11
Figura 3 - Velocidade de impacto das partículas.....	12
Figura 4 - Esquematização processo Arco Elétrico.....	14
Figura 5 - Tocha para Arco Elétrico.....	15
Figura 6 - Microestrutura da camada de Alumínio.....	19
Figura 7 - Ângulo das tangentes à esfera para relação $d/D = 0,375$ na dureza Brinell [8].	20
Figura 8 - Penetrador e impressão Vickers [8].	21
Figura 9 - Arco elétrico marca metallisation, modelo s350 (16).....	23
Figura 10 - Arco elétrico marca tbaarc-spray 300.	24
Figura 11 - Amostras revestidas pelo equipamento Manual.	29
Figura 12 - Amostras revestidas pelo equipamento automatizado com superfície Pinovo.....	30
Figura 13 - Amostras revestidas c/ equipamento Automatizado com superfície SpongeJet	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Poder Calorífico dos Gases.....	12
Tabela 2 - Propriedades do revestimento do processo de Arco Elétrico.....	16
Tabela 3 - Parâmetros utilizados para aspersão térmica automatizada.....	23
Tabela 4 - Composição química do revestimento depositado.....	24
Tabela 5 - Parâmetros de deposição dos revestimentos automatizados.	24
Tabela 6 - Parâmetros de deposição dos revestimentos manual.....	25
Tabela 7 - Média do comprimento da espessura de camada revestida manualmente.....	32
Tabela 8 - Média do comprimento da espessura de camada revestida automaticamente.....	32
Tabela 9 - Média de Microdureza Vickers para Método Manual	33
Tabela 10 - Média De Microdureza Vickers para Método Automatizado.....	33

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	OBJETIVOS	9
1.1.1	Objetivo Geral	9
1.1.2	Objetivo Especifico	9
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1	ASPERSÃO TÉRMICA	10
2.1.1	Aspersão Térmica a Arco Elétrico	13
2.2	REVESTIMENTOS EM ALUMINIO	16
2.2.1	Aderência	16
2.2.2	Porosidade	17
2.2.3	Óxidos	17
2.2.4	Espessura	18
2.2.5	Aspecto Microestrutural	18
2.2.6	Dureza	19
3	METODOLOGIA	22
3.1	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	22
3.1.1	Procedimentos de Aspersão térmica a Arco Elétrico (ASP)	22
3.1.2	Procedimentos do Ensaio de Metalografia	25
4	RESULTADOS	28
4.1	MICROSCOPIA OPTICA	28
4.2	MICRODUREZA VICKERS [HV]	33
5	CONCLUSÃO	35
6	REFERENCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

O uso de materiais de revestimento para a proteção de superfícies começou na engenharia com finalidade inicial o combate à corrosão para conjuntos mecânicos. Porém, com o avanço dos estudos direcionados a esse assunto, hoje em dia pode-se usar esse revestimento para outros fins, como elevar a resistência ao desgaste e a corrosão, utilizar para realizar um isolamento térmico e elétrico, entre outros.

O aumento de estudos relacionados à aspersão térmica, onde esses revestimentos serão utilizados, se deve ao fato de que o princípio fundamental dessa tecnologia é aumentar a vida útil de sistemas e peças, conseqüentemente o gasto do projeto poderá ser reduzido, pois, ao mesmo tempo em que irá prevenir peças de sofrer esses defeitos, poderá também recuperar peças defeituosas, evitando o gasto com a substituição da mesma, obtendo-se assim um máximo desempenho de conjunto e sistemas mecânicos. Para abranger mais estes, é necessário um desenvolvimento de ligas específicas para resistir às mais diversas condições de serviço.

O alumínio é um material bastante utilizado para revestimentos, o mesmo está presente em uma elevada quantidade na Terra e sua obtenção se dá através da mineração da Bauxita, passando posteriormente para as etapas de Refinaria e Redução. Possui como características principais ponto de fusão e peso específico baixo, comparado aos aços, apresenta uma fina camada de óxido cuja função é proteger o metal de oxidações futuras, tornando-o excelente à resistência a corrosão e por não ser ferromagnético, apresenta uma elevada condutividade térmica e elétrica.

Devido a essas características, o alumínio e suas ligas podem ser encontradas em diversas aplicações, como nas estruturas de veículos e aeronaves, peças decorativas (devido sua superfície brilhante e refletiva), construção civil e outros.

O enfoque do presente trabalho foi comparar dois processos de revestimento por arco elétrico utilizando a técnica de aspersão térmica sendo eles manual e automático, utilizando parâmetros semelhantes de soldagem

verificando aspectos da espessura da camada revestida, nível de porosidade e influencia na microdureza.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar o comportamento do revestimento de alumínio em substrato de aço obtido através do processo de Arco Elétrico de Aspersão Térmica com equipamento de aplicação manual e automatizado.

1.1.2 Objetivo Especifico

Comparação da técnica de Aspersão Térmica por arco elétrico manual ou automatizado, mantendo-se os parâmetros de substrato, revestimento e regulagem dos equipamentos constantes quanto à variação da porosidade.

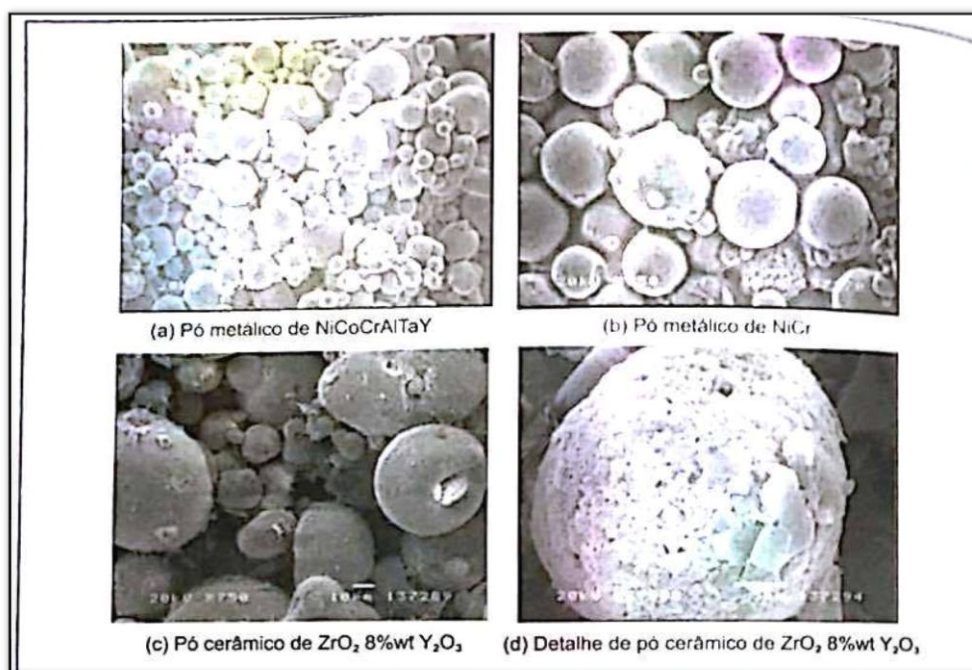
Verificar a influência através do aspecto superficial e das espessuras de camadas revestidas por meio de microscopia ótica e ensaio de microdureza Vickers.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ASPERSÃO TÉRMICA

Seguindo a sua definição, a aspersion térmica é um processo no qual materiais metálicos ou não metálicos, em forma de partículas semi-fundidas ou sólidas, são depositadas sobre um substrato. Conseqüentemente, esse processo é uma forma de gerar um fluxo dessas partículas. [1] As partículas depositadas têm como finalidade proteger e melhorar as propriedades superficiais do substrato. O material que será utilizado como revestimento pode assumir a forma de pó, vareta, cordão ou arame. A figura 1 mostra diferentes tipos de estruturas para o formato de pó. [3]

Figura 1 - Micrografia de pós utilizado sem aspersion térmica.

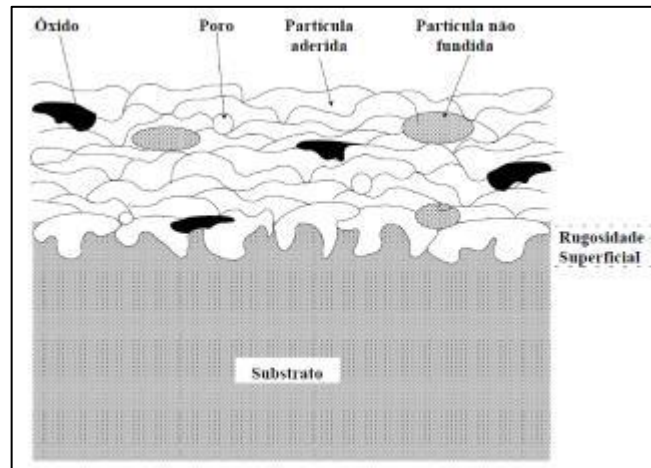


Fonte: (Lima & Trevisan, 2007)

A aspersion térmica descreve uma família de processos que irão utilizar energia térmica provenientes de meios químicos (através da combustão), ou meios elétricos (através do plasma ou arco elétrico) para mudar o estado dos materiais sólidos, tornando-os plásticos ou fundidos e que, posteriormente, são acelerados por um gás comprimido. Devido aos altos valores de velocidade e temperatura dos vapores de partículas confinados, quando essas atingem o

substrato, elas se achatam e formam lamelas, que irão se moldar e aderir à superfície do substrato. Conforme vai ocorrendo os choques entre essas partículas com a superfície, elas se resfriam e constroem lamela por lamela uma estrutura laminar que é característica da aspersão térmica. [3,4,5]. Observa-se na Figura 2, a estrutura laminar comentada.

Figura 2 - Seção transversal de uma superfície aspergida termicamente.



Fonte: (Marques, 2003).

O processo de aspersão é muito amplo, existindo várias opções de processos, como HVOF (*High Velocity Air Fuel*), Plasma APS (*Air Plasma Spray*), HVOF (*High Velocity Oxy-Fuel*), entre outros. [2]. Além disso, existe uma alta quantidade de materiais a serem utilizados como revestimento, vários métodos de aquecimento, e diversos métodos para a aceleração de partículas, tornando a aspersão uma tecnologia conceituada para a solução de problemas que envolvam desgaste, corrosão, degradação térmica, entre outras.

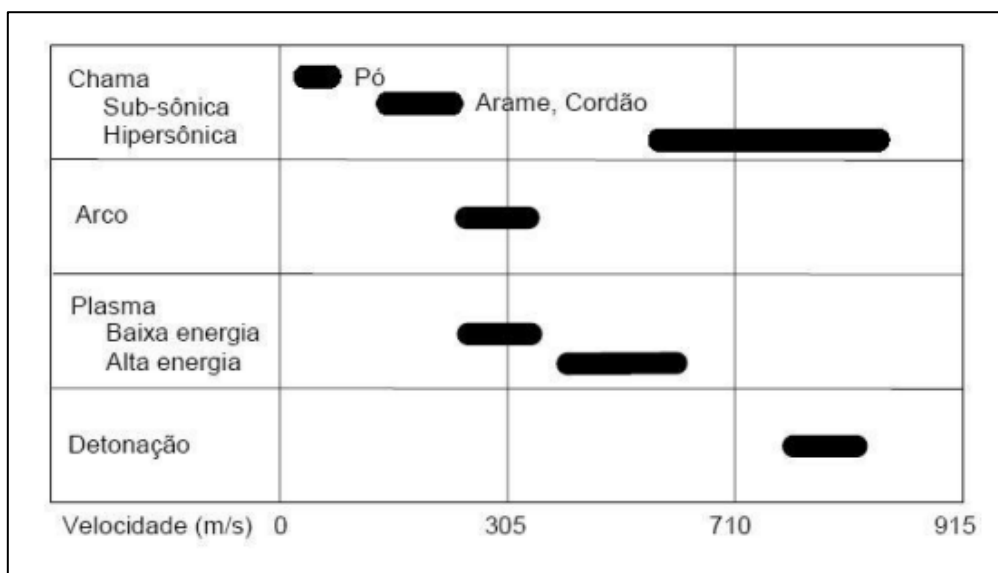
Na figura 3 e na Tabela 1, observam-se dois parâmetros que vão influenciar no decorrer da aspersão. São elas: o poder calorífico dos gases combustíveis e a velocidade de impacto das partículas conforme seus métodos de aplicação.

Tabela 1 - Poder Calorífico dos Gases

Fonte	Temperatura (°C)
Propano + Oxigênio	2526
Gás Natural + Oxigênio	2538
Hidrogênio + Oxigênio	2660
Propileno + Oxigênio	2843
Acetileno + Oxigênio	3087
Arco Plasma	2200 - 28000

Fonte: (ASM, 1994)

Figura 3 - Velocidade de impacto das partículas



Fonte: (Marques, 2003)

Por apresentar vários processos, a aspersão acaba sendo classificada em dois grupos:

I. De Combustão

Onde a fonte de calor é gerada através de gases combustíveis. No grupo está presente:

- Combustão por Chamas
- Combustão por Detonação

II. Elétrico

Onde a fonte de calor é gerada através da energia elétrica. No grupo está presente:

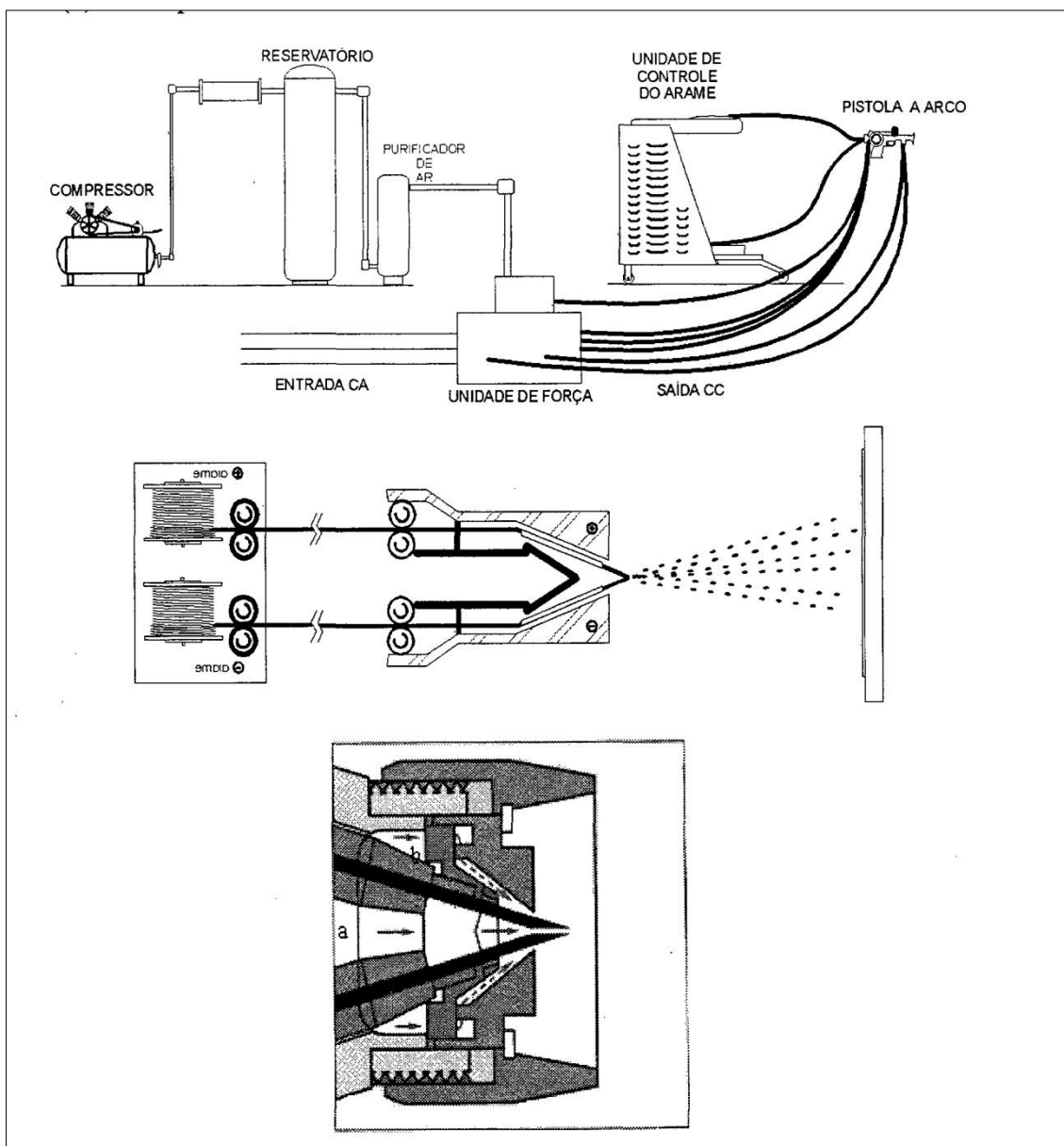
- Plasma de Arco Não-Transferido
- Plasma de Arco Transferido
- Arco Elétrico

2.1.1 Aspersão Térmica a Arco Elétrico

O funcionamento desse processo se dá pela seguinte maneira: Dois fios de eletrodos de arco consumíveis, que estão separados um do outro, são desenrolados das bobinas por meio do acionamento de uma pequena turbina a ar comprimido ou por um motor elétrico. Esses dois fios irão se encontrar em um ponto onde há uma névoa de gás atomizador sendo mais usualmente usado o ar comprimido. Uma gotícula de líquido se forma devido ao aquecimento do arco, através da diferença de potencial aplicada nos fios, na faixa de 18 a 40 volts, e essa gotícula será soprada pelo gás de atomização para o substrato preparado. Podendo atingir uma velocidade de projeção de até 25m/s. As temperaturas geradas no arco elétrico são da ordem de 4000 a 6000°C. [1,3]

Encontra-se na figura 4, um desenho exemplificado todo o processo aspersão por arco elétrico.

Figura 4 - Esquemáticação processo Arco Elétrico



Fonte: (Marques, 2003)

A fim de evitar a aglomeração das partículas em seu percurso até o substrato, as pistolas atuais possuem bico fechado e proteção do jato de ar comprimido secundário. [7]

Figura 5 - Tocha para Arco Elétrico



Fonte: (Pawlowski, 2013)

As vantagens desse processo são [6]:

- Por não possuir nenhuma chama a técnica de Aspersão por Arco Elétrico fará com que o substrato possua um aquecimento menor, devido ao fato da ausência de gases de combustão;
- Maior aderência;
- Maior coesão entre as partículas;
- Maior velocidade de deposição.

As desvantagens desse processo são [6]:

- Oxidação das partículas quando transportadas pelo ar comprimido;
- Aderência prejudicada;
- Necessário uso de gás inerte para transporte das partículas.

As propriedades do revestimento através do processo de Arco Elétrico são encontradas na Tabela 2. [1]

Tabela 2 - Propriedades do revestimento do processo de Arco Elétrico

PROPRIEDADES DO REVESTIMENTO	VALORES
Distância de aplicação	50 a 170 mm
Alimentação de arame	50 a 1000 g/min.
Diâmetro mais comum do arame	1,6 a 5 mm
Corrente	Até 280A
Temperatura	5800°C
Potencia Elétrica	5 a 10kw
Diferença de potencia entre os arames	20 a 40 V
Pressão do gás de atomização	0,2 a 0,7 Mpa
Fluxo de gás de atomização	20 a 1300 l/min.
Velocidade das partículas	150 m/s
Porosidade	10 a 20%
Espessura de camada	0,1 a 2 mm

Fonte: Adaptada de Pawlowski, 2008.

2.2 REVESTIMENTOS EM ALUMINIO

2.2.1 Aderência

A tensão onde um determinado material se rompe é chamada de Resistência Mecânica. Essa propriedade é a mais importante para os materiais que serão utilizados para estruturas. No ambiente de Aspersão Térmica, essa propriedade irá depender da aderência entre o substrato e a camada a ser revestida e também irá depender da coesão entre as partículas que serão depositadas. Essa aderência será de suma importância para verificar a qualidade do revestimento, pois nada adianta uma camada livre de imperfeições sendo que a mesma não possui uma aderência suficiente. [6]

Tratando-se diretamente para a Aspersão Térmica para o alumínio, é de extrema importância a qualidade que a superfície de revestimento irá apresentar, devido principalmente porque a ativação do substrato deverá garantir o ancoramento mecânico. Para se obter uma camada de alumínio com uma melhor aderência, ou seja, uma camada com uma quantidade menor de poros é necessário utilizar processos que vão favoreceres o mecanismo de aderência metalúrgica. [6.15]

Quando a aderência entre o substrato e a camada a revestida não apresentam resultados satisfatórios, devem-se analisar os principais fatores que participam de todo o processo de Aspersão Térmica e seus parâmetros: material de aporte, gás de transporte e preparação da superfície do substrato. [6]

2.2.2 Porosidade

Durante a solidificação do metal de solda, em qualquer processo de soldagem, poderá surgir um espaço vazio em forma de cavidade devido ao aprisionamento de gases, esse vazio trata-se de um defeito de soldagem conhecido como Porosidade. Esse defeito não deve ser visto como algo ruim, visto que pode ser facilmente evitado, e na maioria das vezes, esse defeito não afetará de forma grandiosa as propriedades mecânicas, exceto quando o mesmo se encontrar afloradas à superfície. [7,8]

A Porosidade pode ocorrer de três modos: Resultado de reações químicas na poça de fusão, pela expulsão do gás de solução à medida que a solda solidifica e pelo aprisionamento de gases na base de poças de fusão turbulenta na soldagem com gás de proteção. O surgimento de revestimentos contendo porosidade está relacionado aos parâmetros de soldagem de cada processo de aspersão térmica, como temperatura do arco elétrico, gás de transporte, velocidade, distância entre a pistola e o substrato, entre outros. [6,8]

Os níveis de porosidade da solda são controlados por quatro fatores importantes: a primeira trata-se do teor de hidrogênio dos materiais, a segunda é a taxa na qual o hidrogênio é absorvido, a terceira é o volume de gás que pode ser mantido na solução sólida no metal de solda a quarta é a taxa de bolhas de gás que podem escapar. [9]

2.2.3 Óxidos

Para os processos de Aspersão térmica, as formações de óxidos estão ligadas com a atmosfera pela qual as partículas serão depositadas e transferidas e superaquecidas no bico da pistola. As principais fontes de

oxidação são: gás de transporte, ar do meio ambiente e as partículas e/ou camada já presas ao substrato. [6]

A maior parte da oxidação dos depósitos ocorre sobre a superfície revestida. [10]

2.2.4 Espessura

A espessura da camada depende da otimização de varias outras propriedades para obter sua definição. Viabilizar sua aplicação em função do ciclo de vida e do seu custo, apresentando assim uma espessura mínima para possibilitar um adequado desempenho e uma máxima que não inviabilize o uso. Tamanho do pó (granulométrica) e/ou diâmetro do arame em conjunto com velocidade de avanço da pistola e fluxo de material controlam a espessura mínima enquanto a quantidade de demãos controla espessura total. [6]

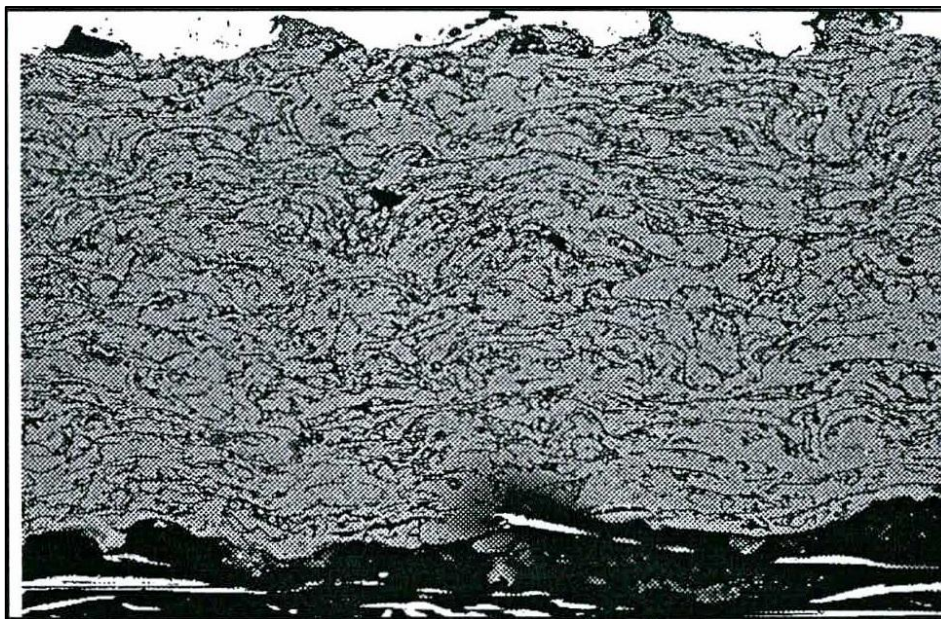
Para obtenção de camadas com maior densidade é preferencialmente utilizado poucas demãos com baixa velocidade e alto fluxo enquanto alta velocidade reduziria a dissipação de calor, pois as espessuras de camadas de cada demão seriam menores e proporcionariam maior microdureza. [6]

Na escolha da espessura de revestimento de Al outro fator que importa é relação eletroquímica revestimento/substrato. Para revestimento anódico em relação ao substrato a presença de poros não é fator primário, sendo a espessura de revestimento na ordem de 70 μ m. Para revestimento catódica em relação ao substrato são aplicados com espessura suficiente para eliminar poros interconectados, sendo espessura de revestimento na ordem de 250 μ m a 500 μ m. Portanto, nas camadas de Al, o principal objetivo é viabilizar uma espessura que garanta o menor nível de porosidade e elimine os poros passantes até o substrato. [6]

2.2.5 Aspecto Microestrutural

Na figura observa-se a microestrutura da camada de Al depositada pelo processo ASP a que forma uma estrutura com camadas lamelares de menor espessura bem aderidas entre si e tem menor quantidade de poros e maior oxidação. [6]

Figura 6 - Microestrutura da camada de Alumínio.



Fonte: PAREDES, 1998

Nas camadas de Al é importante considerar na zona de ligação (camada/substrato) a possível difusão do Al no aço, que permitiria a formação de intermetálicos FeAl, que conferem excelente resistência à corrosão, a formação de intermetálicos na zona de ligação poderia ser influenciada por variáveis de processo de Aspersão Térmica e ainda também por eventuais tratamentos térmicos posteriores. [6]

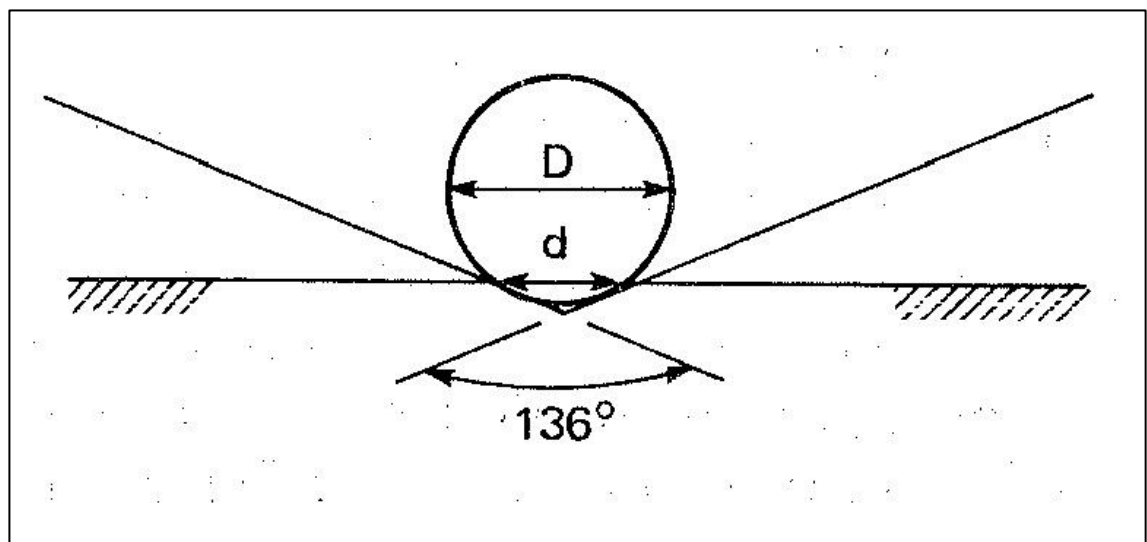
2.2.6 Dureza

Fundamentalmente a dureza não é uma propriedade elementar de um material, como por exemplo, a resistência a tração. Sua avaliação tem caráter de certo modo empírico e diferentes métodos de medida podem fornecer resultados não concordantes. Apesar disso, a dureza de uma camada tem muitas vezes grande importância prática, pois podem ser correlacionada com outras propriedades como desgaste, fadiga e corrosão. Além disso, pode servir como parâmetro de referência indireto para fixação de variáveis de aspersão térmica. No caso específico das camadas depositadas por aspersão térmica, devido a sua natureza heterogênea (com óxidos e variável grau de porosidade), deve-se distinguir entre: “macro dureza aparente” e microdureza das partículas [8].

O método mais aplicado é o da microdureza com penetrador tipo Vickers ou Knoop, realizado na seção transversal de um corpo de prova preparado de maneira similar ao que é feito para exame metalográfico. Ambos têm a vantagem de utilizar uma escala de dureza contínua e independente da carga. Esta é selecionada em função das dimensões e natureza do cp. Para materiais mais duros, metálicos ou cerâmicos, tomou-se difundida a microdureza Vickers medida com carga de 300g (HV0, 3). Outros autores constataram em camadas de Al depositadas por ASP dureza média de 20 HB com 0,35 MPa de pressão de ar do "spray" e 27 HB com 0,45 MPa [8].

Essa dureza foi introduzida em 1925, o penetrador é uma pirâmide de diamante de base quadrada com ângulo de 136° entre as faces opostas, assemelhando-se a dureza Brinell pela relação ideal de d/D sendo 0,375.

Figura 7 - Ângulo das tangentes à esfera para relação $d/D = 0,375$ na dureza Brinell [8].



Fonte: Souza, 1982.

Sendo o penetrador de diamante praticamente indeformável e as impressões semelhantes entre si à dureza Vickers (HV) independente da carga para materiais homogêneos, a mudança da carga é necessária apenas para obter impressões mais regulares, sem deformações para obter melhores

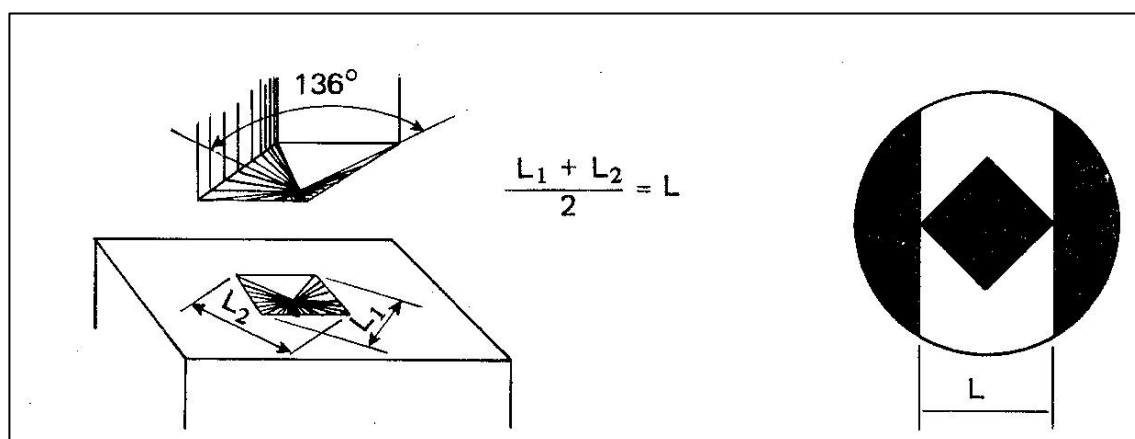
medidas, a forma de impressão é um losango regular e conforme a média L das diagonais obtém-se a dureza Vickers. [8]

$$HV = 18544Q/L^2$$

Q é [Kgf] e L em [mm]

A dimensão Vickers é dado por $HV = [kgf/mm^2]$ fornecendo uma escala continua de dureza entre 5 até 1000 kgf/mm^2 para cada carga usada no entanto para cargas pequenas deverá ser mencionada a carga usada cada vez que ensaiar um metal. [8]

Figura 8 - Penetrador e impressão Vickers [8].



Fonte: Souza, 1982.

As principais vantagens do método Vickers são: uma escala continua; medidas precisas; penetrador não deforma; ensaio não destrutivo; aplica-se a toda gama de durezas encontradas nos materiais; aplicação a qualquer espessura, podendo também medir durezas superficiais.

Muito se é utilizado à dureza Vickers para pesquisas para determinação de profundidade de temperas profundidade de camadas de proteção superficiais profundidade de descarbonetação, para laminas finíssimas, para metais muito duros ou moles, dentre outros.

3 METODOLOGIA

Neste tópico serão discutidos os materiais e os procedimentos utilizados para aspensão térmica, preparação das amostras, caracterização e análise da microestrutura e ensaio de microdureza.

3.1 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os experimentos de aspensão térmica feitos no presente trabalho foram realizados em dois laboratórios: laboratório da Universidade Federal do Paraná e laboratório da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

. Os parâmetros de Aspensão, material de revestimento e o material do substrato foram definidos na Universidade Federal do Paraná (UFPR), pois a primeira parte experimental foi realizada em seus laboratórios, em 2018/02, com pelo Professor Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz. Já a segunda parte do experimento foi realizada no Laboratório de soldagem existente dentro da Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo Professor Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz.

3.1.1 Procedimentos de Aspensão térmica a Arco Elétrico (ASP)

Para o presente trabalho, foi realizado o experimento em dois equipamentos diferentes. Denominou-se como equipamento A, o equipamento automatizado utilizado no laboratório da Universidade Federal do Paraná, e equipamento M, o equipamento manual utilizado no laboratório da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Os métodos correspondentes aos equipamentos utilizados são Método A e M, respectivamente.

3.1.1.1 Parâmetros para aspersão térmica

O Equipamento A utilizado para deposição do revestimento na Universidade Federal do Paraná foi do tipo arco elétrico, marca Metallisation, modelo a S350- ARC140 conforme Figura 9. A deposição dos revestimentos foi realizada por robô e os parâmetros utilizados encontram-se na Tabela 3. As %Velocidade e %Aceleração são ajustes associados à velocidade e aceleração no conjunto de juntas do robô, elas foram selecionadas de modo que o robô apresentasse trajetória suave.

Tabela 3 - Parâmetros utilizados para aspersão térmica automatizada.

Velocidade (m/min)	Quantidade de Passe	% Velocidade	% Aceleração
5,4	1	0,30	0,25

Fonte: (autoria própria)

Figura 9 - Arco elétrico marca metallisation, modelo s350 (16).



FONTE: (Metallisation, 2016).

A composição química do revestimento depositado está descrita na Tabela 4e os parâmetros de deposição na Tabela 5.

Tabela 4 - Composição química do revestimento depositado.

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Outros
99,0 min.	0,30	0,40	0,20	0,05	0,07	0,20

Fonte: (Os autores, 2018).

Tabela 5 - Parâmetros de deposição dos revestimentos automatizados.

Variável	Parâmetro
Distância pistola-substrato	100mm
Pressão Ar	5,9bar
Tensão	32V
Corrente	160 ^a

Fonte: (Os autores, 2018).

O Equipamento M utilizado para deposição do revestimento na Universidade Tecnológica Federal do Paraná foi do tipo arco elétrico, marca TBA, modelo ARC-SPRAY 300 conforme Figura 10. A deposição dos revestimentos foi realizada manualmente.

Figura 10 - Arco elétrico marca tbaarc-spray 300.

Fonte: (Autores, 2018)

A composição química do revestimento depositado é a mesma descrita na Tabela 4e os parâmetros de deposição na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros de deposição dos revestimentos manual.

VARIÁVEL	PARÂMETROS
Distância Pistola	100~150
Pressão Ar	7 Bar
Tensão	37 V
Corrente	120 A

Fonte: (Autores, 2018)

3.1.2 Procedimentos do Ensaio de Metalografia

O procedimento de Metalografia ocorre após a deposição do revestimento no substrato.

Os Ensaio de Metalografia apresentam um padrão de execução. São eles: Corte Lixamento, Polimento e Ataque Químico (não será utilizado no presente trabalho).

Esse procedimento foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais, localizado no campus de Ponta Grossa da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, com a supervisão da professora Sandra Tramontin.

3.1.2.1 Corte

Fez-se necessário um corte no corpo de prova para melhorar a realização de futuros testes. A máquina utilizada para esse fim é a MAXI CUT (Metalotest).

Antes de começar o corte o corpo de prova é fixado em uma estrutura interior da máquina, e jatos, onde o fluido de corte irá passar, são direcionados para o lugar onde haverá o corte. Após esse procedimento, a máquina é fechada, o fluido é acionado e verifica-se se os mesmo atingem a área desejada. Em seguida, liga-se o motor Weg da máquina, fazendo com que o disco de corte inicie sua rotação. O avanço do disco é controlado por um

operador com um movimento constante. Esse movimento não pode ser rápido e brusco para não quebrar o disco de corte e garantir um bom aspecto de corte da amostra. Depois de realizado o corte, desliga-se o fluido, abre-se a máquina e verifica se o corte feito é o ideal.

3.1.2.2 Lixamento

Tem como principal objetivo eliminar riscos e marcas mais profundas da superfície dando um melhor acabamento à mesma.

A técnica de lixamento manual consiste em se lixar a amostra sucessivamente com lixas cada vez menor que no presente trabalho foram utilizadas lixas d'água com granulometria de #300, #400, #600 #1200 e #2000 Mesh, mudando-se de direção (90°) em cada lixa na sequência, até desaparecerem os traços da lixa anterior, e assim sucessivamente.

3.1.2.3 Polimento

O procedimento de polimento realizado visou obter uma superfície plana, livre de riscos e com alta refletividade. O polimento foi realizado num ambiente sem pó, separado da área de corte e lixamento. Tanto a amostra quanto as mãos do polidor foram bem higienizadas entre cada estágio.

Foi utilizado um feltro novo e mergulhado em um recipiente cheio de água destilada por um período. Como agente polidor, utilizou-se uma suspensão de diamante Kemet Diamond suspension 3-WM, que foi borrifada sobre o feltro de polimento. Após isso, ligou-se o gotejamento de água, para retirada de impurezas, e o motor do equipamento, fazendo-o girar no sentido horário.

Feito isso, segurou-se levemente o corpo de prova em cima do pano de polimento, movimentando o corpo de prova no sentido contrário do movimento do feltro.

3.1.2.4 Microscópio óptico

O modelo de equipamento utilizado para microscopia óptica foi o microscópio óptico OLYMPUS modelo BX60.

A região de interesse foi à espessura de camada do revestimento e a região de interface entre os materiais.

As imagens capturadas são passadas para o computador com auxílio de software de captura de imagens Olympus Image Analysis Software. É importante ressaltar que a escala usada no microscópio deve ser idêntica a escala demarcada no software para evitar erros nos resultados, a qual foi usada a de 100X.

3.1.2.5 Microdureza Vickers

Para o ensaio de microdureza Vickers foi utilizado o microdurometro da marca Shimadzu HMV-20G localizado no laboratório de materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Foi definido como parâmetro na amostra o centro do material revestido e a região próxima a superfície do material substrato para realização das marcações. Utilizou-se para as medições a carga de 100 gf por 15 segundos, sendo definidas oito regiões de interesse aleatórias na extensão do revestimento para realização do ensaio.

Para obter o valor de microdureza medem-se as diagonais do losango formado obtendo assim a medida da microdureza na escala Vickers (HV).

4 RESULTADOS

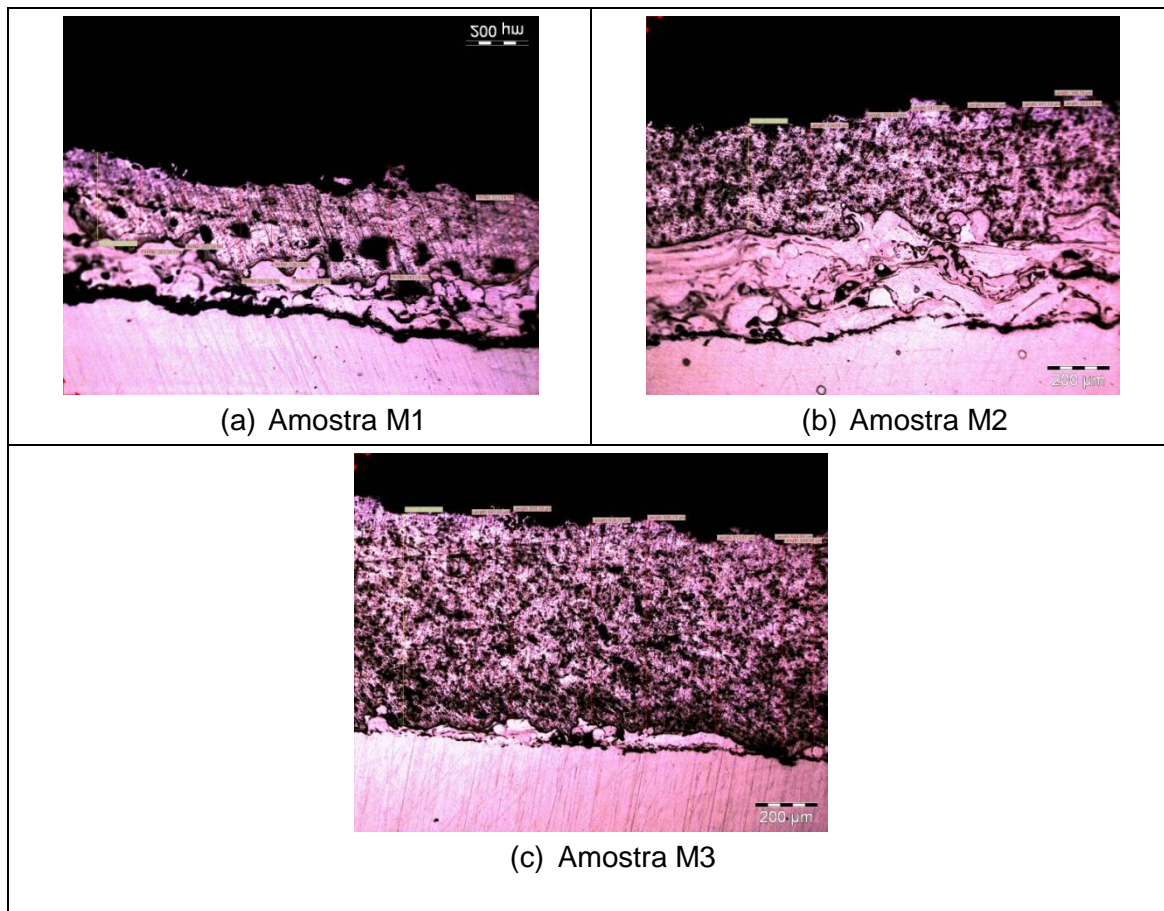
4.1 MICROSCOPIA OPTICA

Cada amostra foi dividida em quatro regiões de interesse para realização das medidas, nessas regiões foi realizada oito medições para analisar a homogeneidade do comprimento da espessura da camada de revestimento, verificar se há poros contidos, oxidações e a forma lamelar.

As amostras obtidas a partir do Equipamento M foram nomeadas de M1, M2 e M3, presentes na figura 11. Pode-se observar que nestas, já continha um material revestido antes da deposição de alumínio. Observou-se uma alta quantidade de poros nas amostras, uma ótima aderência do alumínio na camada do material já depositada devido a esse aparentar ter uma boa rugosidade. E os comprimentos da camada de revestimento, nos pontos medidos, não sofreram muitas alterações, mantendo-se constantes, comprovando a sua homogeneidade.

Os principais fatores que influenciaram para a alta quantidade de poros, variação da espessura da camada e aderência do alumínio no substrato são característicos da técnica do operador, da distância entre a pistola até o substrato aparentou estar mais distante de 150mm e do equipamento que não estava com o seu funcionamento ideal. Os carretéis, onde passava o arame de alumínio, não estava sincronizada, com isso, a diferença de potencial era afetada causando falhas na projeção do revestimento ao substrato.

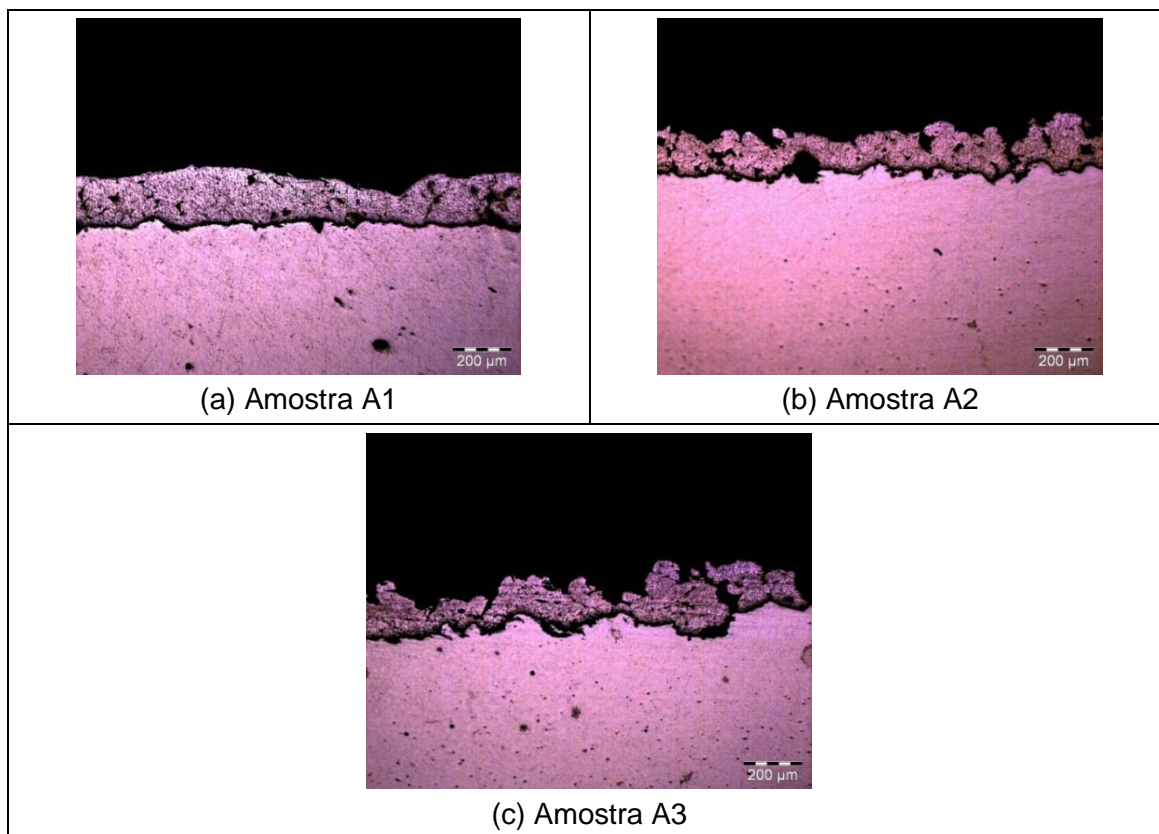
Figura 11 - Amostras revestidas pelo equipamento Manual.



Fonte: (autoria própria)

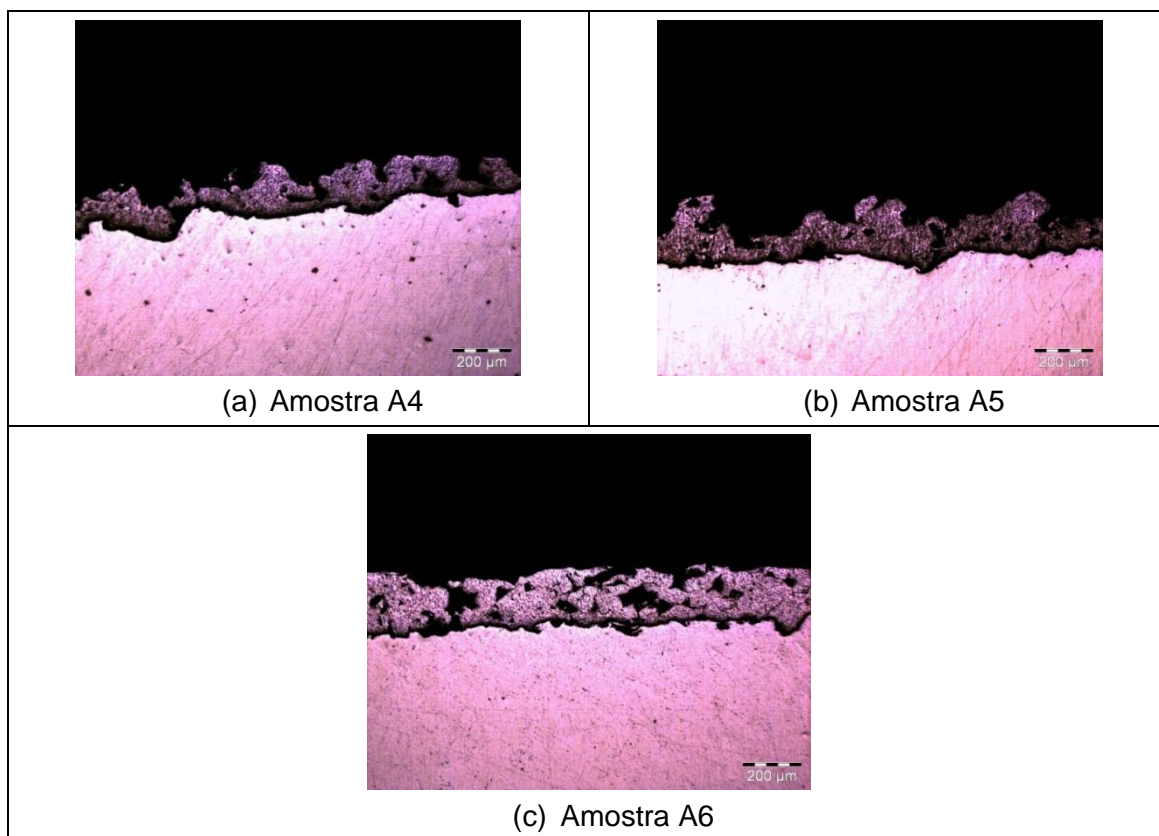
As amostras obtidas a partir do Equipamento A foram divididas em duas categorias: As que sofreram um jateamento com método abrasivo Pinovo, e as que sofreram um jateamento com método abrasivo Sponge-Jet. As amostras para a primeira categoria são A1, A2 e A3 e para a segunda são A4, A5, A6, mostradas nas figuras 12 e 13, respectivamente.

Figura 12 - Amostras revestidas pelo equipamento automatizado com superfície Pinovo.



Fonte: (autoria própria)

Figura 13 - Amostras revestidas c/ equipamento Automatizado com superfície SpongeJet



Fonte: (autoria própria)

Para as amostras A1, A2 e A3 notou-se uma quantidade baixíssima de poros, em todos os quatro pontos de cada amostra, não houve nenhuma região que se apresenta um maior nível de porosidade, a quantidade parecia constante para essas regiões. Observou-se também uma grande quantidade de incrustações na camada de revestimento, e acredita-se que essa ocorrência se deve ao fato de que foi realizada apenas uma passada de material depositado, da condição da superfície e do próprio equipamento utilizado.

Para as amostras A4 E A5 observou-se a formação de ondulações em formas de vales e picos em conjunto com incrustações no revestimento aplicado, tornando o revestimento heterogêneo. Também se observou que existiam regiões onde o revestimento estava completamente depositado tornando-se essas regiões homogêneas. Essa diferença de características dá-se pela quantidade de passes realizada, que no caso foi uma vez, não sendo a ideal para analisar existência de poros, característica da superfície do substrato e equipamento que realizou o procedimento.

Já a amostra A6, foi percebida uma homogeneidade da camada revestida apesar de conter incrustações.

As medições para o tamanho da camada do revestimento de alumínio foram feitas de maneira aleatória, de modo a pegar regiões que continham e não continham porosidade, incrustação e outros defeitos de soldagem.

Na tabela 7 e tabela 8 são mostradas as médias dessas medições realizadas pelos equipamentos, manual e automático respectivamente.

Tabela 7 - Média do comprimento da espessura de camada revestida manualmente.

Amostra	Média (μm)
M1	243,09
M2	386,82
M3	665,84

Fonte: (autoria própria)

Tabela 8 - Média do comprimento da espessura de camada revestida automaticamente.

A1	144,03
A2	136,33
A3	146,60
A4	92,39
A5	124,82
A6	150,77

Fonte: (autoria própria)

Os valores da tabela 7 mostram que no Método Manual, para as amostras M1, M2 e M3, os parâmetros de aspensão, como velocidade de partícula, distância pistola-substrato e número de passes interfere na homogeneidade do revestimento, diferenciando as três amostras em tamanho da espessura e quantidade de poros, isso se deve ao fato de que tanto o número de passadas não foi controlado quanto à distância entre a pistola e o substrato ficou restrito a técnica do operador.

Os valores da tabela 8 mostram que no Método Automático, para as amostras A1, A2, A3 e A6, mostram uma uniformidade no comprimento da espessura de camada devido aos parâmetros controlados para o experimento. As amostras A4 e A5 demonstram discrepância em relação a média do

comprimento, devido a erros inerentes do equipamento, da qualidade da superfícies, da quantidade de passes realizados.

O método A como parâmetros reguláveis para um processo automatizado demonstram uma média uniforme do comprimento da espessura de camada revestida pelo fato de conseguir controlar os parâmetros.

4.2 MICRODUREZA VICKERS [HV]

Na tabela 9 e tabela 10 são mostradas médias das microdureza Vickers analisadas para o método manual e automático respectivamente.

Tabela 9 - Média de Microdureza Vickers para Método Manual

AMOSTRA	MÉDIA DE MICRODUREZA (HV)	
	REVESTIMENTO	SUBSTRATO
M1	58,875	248,625
M2	44,9625	245,5
M3	63,0125	240,625

Fonte: (autoria própria)

Pelos dados mostrados na tabela 9 identifica-se um delta de variação de 18 HV entre a amostras

Tabela 10 - Média De Microdureza Vickers para Método Automatizado

A1	51,3	147,25
A2	54,3	186,25
A3	52,775	184,75
A4	48,1	154,875
A5	52,4	148
A6	49,075	170,75

Fonte: (autoria própria)

Pelos dados mostrados na tabela 10 identifica-se um delta de variação de 3 HV para as mostras A1/A2/A3, e um delta de variação de 4,3 HV para as amostras A4/A5/A6.

Os resultados apresentados na tabela ficaram dentro de uma faixa de microdureza aceitável para o alumínio, variâncias ocorridas no resultado provem da homogeneidade da camada e tamanho da espessura de camada, quantidade de porosidade não influenciou, pois os revestimentos M1, M2, M3 continham mais poros e apresentam mais microdureza, as amostra A1, A2, A3 demonstram serem as mais uniformes em todos os aspectos, as amostras A4, A5 e A6 demonstram não uniformidades provavelmente devido à superfície do substrato influenciando em um decréscimo no valor da microdureza.

5 CONCLUSÃO

A variação da mesma técnica de aspersão, quando aplicada de forma automática e manual influenciou de forma significativa nas características das camadas de revestimento obtidas, principalmente nos parâmetros de espessura da camada e homogeneidade da camada de revestimento.

O revestimento obtido via técnica manual apresentaram maior variação na homogeneidade do revestimento e também maior variações de espessura.

O revestimento obtido via técnica automática apresentaram maior variação na rugosidade superficial do revestimento e regiões de baixa aderência e camadas finas.

Para a técnica de Microdureza Vickers os resultados apresentaram grande similaridade, para as duas técnicas utilizadas,

As microestruturas formadas pelos revestimentos apresentaram grande similaridade entre elas, sendo possível constatar uma maior porosidade para as amostras aspergidas com a técnica manual.

Por dependência da qualidade da técnica do operador para aspergir manualmente esse processo torna-se mais flexível em relação ao automatizado, podendo ser aplicado em diversas angulações da pistola para com o substrato, já o automatizado fica limitado às configurações da pistola--substrato onde usualmente configura-se no plano vertical e horizontal não havendo possibilidade de uma angulação para geometrias mais complexas.

6 REFERENCIAS

[1] PAWLOWSKI, L. **The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings**, New York, John Wiley & Sons. 1995.

[2] SMITH, R.W.; NOVAK, R. **Advances and applications in U.S. thermal spray technology**. *Powmetallurgyinternational*, n. 3, v. 23, p. 147 – 154, 1991

[3] LIMA, C.R.C., TREVISAN, R.E. **Aspersão Térmica: Fundamentos e Aplicações**. 2nd ed., São Paulo, Artliber, 2007. 152p.

[4] US ACADEMY

[5] J.R. Davis, **Handbook of Thermal Spray Technology**, ASM International, Materials Park, OH, 2004, p 1-36

[6] PAREDES, R. S. C. **Estudo de revestimentos de alumínio depositados por três processos de aspersão térmica para a proteção do aço contra a corrosão marinha**. 245 p. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

[7] MANUAL METCO **Pistol 4R ARC Spray System**. Bulletin 268.12p. 1992.

[8] Souza, S. (1982). **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. 5th ed. São Paulo (SP): E. Blucher, p.123 a 130.

[9] BERNDT, C. C., BERNECKI, T., et.al, **Handbook of Thermal Spray Technology**, ASM International, 2004.

[10] Paulo Rogerio Santos de Novais. **Avaliação das principais descontinuidades encontradas nas juntas soldadas, causas e possíveis soluções** - Contribuição técnica nº 9. [Associação Brasileira de Construção Mecânica 2010.]

[11] PAREDES, Ramón S. C.. **DEFEITOSEMSOLDAGEM**. Curitiba: Slide, 2018. 36slides, color.

[12] WOODS, R.A. **Porosity and Hydrogen Absorption in Aluminum Welds**. *Welding Journal*, v. 53, n. 3, p. 97s-108s, Mar. 1974.

[13] BALLARD, W.E, **Metal Spraying and the Flame deposition of Ceramics and plastics**, 4^o. Edição, Charles Griffin 1963, cap.5. Londres 1963.

[14] CARACTERÍSTICAS Químicas e Físicas. 2018. Disponível em: <<http://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/>>. Acesso em: 15 nov. 2018.

[15] **Procedimentos e verificações recomendadas durante a aplicação de Alumínio por Aspersão térmica em risers da ABB VECTO GRAY**. GP Metalização Industrial, 9p. Março 1997.