



Cristiano Borchate

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA
ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO**

Horizontina

2013

Cristiano Borchate

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA ASPERSÃO
TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina.

ORIENTADOR: Richard Thomas Lermen, Dr.

Horizontina

2013

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTALINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:

**“DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA ASPERSÃO TÉRMICA POR
ARCO ELÉTRICO”**

Elaborada por:

Cristiano Borchate

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica

**Aprovado em: 28 /11 /2013
Pela Comissão Examinadora**

**Prof. Dr. Richard Thomas Lermen
Presidente da Comissão Examinadora - Richard Thomas Lermen, Dr.**

**Prof. Me. Valtair de Jesus Alves
FAHOR – Faculdade Horizontalina**

**Prof. Dr. Fabiano Cassol
FAHOR – Faculdade Horizontalina**

**Horizontalina
2013**

DEDICATÓRIA

Com a conclusão deste trabalho, preciso mencionar as pessoas que se disponibilizaram a dar o que pudessem para que esta produção aqui estivesse.

Com isso dedico este trabalho aos meus pais, que me proporcionaram uma vida digna, onde eu pude crescer acreditando que tudo é possível desde que sejamos honestos e íntegros de carácter. A minha esposa Carine, por me aconselhar e me ouvir, e a toda minha família por me acompanhar durante o término desse trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado forças e iluminando meu caminho para que pudesse concluir mais uma etapa da minha vida.

Aos meus pais, que me proporcionaram a educação necessária para chegar até aqui.

A minha esposa Carine, por estar sempre me auxiliando e torcendo para que meus objetivos sejam alcançados, tanto nas horas boas quanto nas ruins sempre esteve do meu lado, mostrando que sempre há um novo caminho para ser seguido, agradeço pelo companheirismo e apoio.

Aos meus irmãos, Cristiane e Cristian pelo carinho e atenção que sempre dedicaram a mim, sempre me apoiando em todos os momentos, enfim pelos conselhos e pela confiança em mim depositada.

Em especial meu agradecimento ao meu orientador Dr. Richard Thomas Lermen, pelo ensinamento e dedicação dispensados no auxílio à concretização desse trabalho, desde as primeiras discussões até as muitas rediscussões sobre qual o melhor caminho a seguirmos, passando pelas diversas semanas de acampamento para que concretizássemos este trabalho, meu muito obrigado.

Também agradeço aos professores do Curso de Engenharia Mecânica pelos ensinamentos e aos colegas com os quais construí grandes amizades tendo o prazer de interagir durante o decorrer do curso.

Por fim, a Faculdade de Horizontina- FAHOR- que desde a minha chegada me recebeu calorosamente, proporcionando em todos os momentos as melhores condições para a conclusão do curso.

“O valor de um homem deve medir-se pelo que dá e não pelo que recebe. Não se converta em um homem de sucesso se não num homem de valores” (Albert Einstein).

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho foi desenvolver um dispositivo de aspersão térmica a arco elétrico. Este equipamento é utilizado para criar revestimentos de peças e componentes que estão sujeitos à corrosão e também para recuperação de peças que sofreram algum tipo de desgaste. Para o desenvolvimento do equipamento de aspersão térmica foram utilizados um retificador de solda solmig VI 320, dois alimentadores de arame (modelo SWM-20 da marca solmig), duas tochas MIG/MAG, compressor de ar SCHULZ CSL 20 BR/200 I, válvula controladora de vazão e um rolo de arame de Solda MIG Alumínio ER4044 1,0 mm, utilizado como material de adição para fazer os revestimentos. Também foi necessário projetar um dispositivo de bancada, para a fixação das tochas MIG-MAG, o dispositivo tem a função de fixar e ajustar as tochas de modo que formam um arco elétrico entre si. Após o desenvolvimento do equipamento de aspersão térmica, foram feitos alguns estudos onde foram variados, a pressão do ar comprimido, a corrente elétrica e tensão e a distância de aplicação. No processo de aspersão térmica por arco elétrico foram analisados sete tipos de materiais, com propriedades e características diferentes, os materiais analisados são o alumínio, aço SAE 1020, aço inoxidável, amianto, refratário, cobre e bronze. A partir das análises feitas, com os materiais, foi possível identificar que o amianto, cobre, e bronze não tiveram aderência, já o alumínio, aço inoxidável, aço SAE 1020 e o refratário apresentaram uma boa aderência. Assim, o dispositivo desenvolvido é indicado para fazer revestimento sobre superfície de metais ferrosos, cerâmicos e alumínio, pois os resultados encontrados nestes materiais foram aceitáveis, pois apresentaram uma boa aderência sobre o substrato e uma aplicação uniforme.

Palavras-chave: Aspersão térmica. Arco elétrico. Alumínio.

ABSTRACT

The main objective of this work was to develop a device for electric arc thermal spray. This equipment is used to make coatings of parts and components that are subject to corrosion, also for recovery of parts that have suffered some type of wear. For the development of thermal spray equipment were used rectifier welding solmig VI 320, two wire feeders, Model SWM-20 brand solmig, Two MIG/MAG, Air Compressor SCHULZ CSL 20 BR/200 I, Valve Controller flow and a roll of wire ER4044 MIG Welding Aluminum 1.0 mm, used as filler material for making coatings. It was also necessary to developed a workbench to attachment the torches of MIG-MAG, the device has the function to set and adjust the torches forming an arc between them. After develop the thermal spray equipment, some studies were made to varying the pressure of the compressed air, electric current, voltage and distance of application. In the process of electric arc thermal spray were analyzed seven types of materials with different properties and characteristics, the materials that were analyzed, aluminum, SAE 1020 steel, stainless steel, asbestos refractory, copper and bronze. From the analysis made with the materials it was possible to identify that the asbestos, copper, bronze did not have grip, as aluminum, stainless steel, refractory steel SAE 1020 had a good grip. However, the developed device is suited for making coating on the surface of ferrous metals, ceramic and aluminum, as the results found in these materials were acceptable because they presented a good adhesion to the substrate and uniformity.

Keywords: Thermal spraying, Arc Electric, Aluminum.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Características da formação da camada depositada por Aspersão Térmica.	14
Figura 2: Aspersão térmica por chama, com vareta como material de adição.....	17
Figura 3: Tocha de alta para aspersão térmica com pó.	18
Figura 4: esquema de uma instalação para aspersão termica de arco elétrico.	21
Figura 5: Aspersão térmica por arco elétrico.....	22
Figura 6: Desenho esquemático do processo de aspersão térmica por arco elétrico.	26
Figura 7: Fonte de potência e alimentadores utilizados no processo de aspersão.....	29
Figura 8: componentes utilizados para a fabricação do equipamento de aspersão térmica.	31
Figura 9: Sistema completo para o processo de aspersão térmica.	32
Figura 10: Interruptor de acionamento.	33
Figura 11: Tochas montadas no dispositivo de aspersão.....	33
Figura 12: Preparação do substrato.....	34
Figura 13: Materiais analisados.	35
Figura 14: Gerador de fluxo de ar.	36
Figura 15: Posição das tochas de soldagem.....	37
Figura 16: Revestimento sem aderência retirado do substrato.	38
Figura 17: Arame de alumínio enrolado.	39
Figura 18: Equipamento de aspersão térmica em funcionamento.....	40
Figura 19: Testes com variação da corrente elétrica.....	42
Figura 20: Teste de dobra.....	44
Figura 21: Madeira.....	45
Figura 22: Cobre.....	45
Figura 23: Aço SAE 1020.	46
Figura 24: Bronze.	47
Figura 25: Amianto.	47
Figura 26: Aço inoxidável.....	48
Figura 27: Refratário.....	49
Figura 28: Alumínio.....	50

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 REVISÃO DA LITERATURA	12
2.1 ORIGEM DA ASPERSÃO TÉRMICA.....	12
2.2 ASPERSÃO TÉRMICA	13
2.2.1 PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE	16
2.3 MÉTODOS DE ASPERSÃO TÉRMICA	16
2.3.1 ASPERSÃO POR CHAMA A GÁS	17
2.3.2 ASPERSÃO POR DETONAÇÃO	18
2.3.3 ASPERSÃO POR COMBUSTÃO CONTÍNUA	19
2.3.4 A ASPERSÃO TÉRMICA HVOF “ <i>HIGH VELOCITY OXYFUEL FLAME</i> ”	19
2.3.5 ASPERSÃO POR PLASMA.....	19
2.3.6 ASPERSÃO POR ARCO ELÉTRICO.....	20
2.3.7 PARÂMETROS DO PROCESSO.....	23
2.3.7.1 GÁS DE ARRASTE.....	24
2.3.7.2 AVANÇO DO ARAME E CORRENTE.	24
2.3.7.3 TENSÃO.....	25
2.3.7.4 DISTÂNCIA DE ASPERSÃO.	25
2.3.7.5 ASPERSÃO POR ARCO ELÉTRICO COM ALUMÍNIO	27
3 METODOLOGIA.....	28
3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS	28
3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	28
3.2.1 EQUIPAMENTO DE ASPERSÃO	28
3.2.2 LIGAÇÃO DOS ALIMENTADORES DE ARAME	32
3.2.3 FABRICAÇÃO DO DISPOSITIVO	33
3.2.4 MATERIAL DE ADIÇÃO E CORPO DE PROVA	34
3.2.5 GERADOR DE FLUXO DE AR.....	35
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	37
4.1 PROJETO E FABRICAÇÃO DO EQUIPAMENTO	37
4.1.1 DISPOSITIVO PARA FIXAÇÃO DAS TOCHAS	37
4.1.2 TESTES INICIAIS COM O EQUIPAMENTO DE ASPERSÃO TÉRMICA	38
4.2 TESTES E ANÁLISES	39
4.2.1.1 VARIAÇÃO DA PRESSÃO.....	40
4.2.1.2 VARIAÇÃO DA CORRENTE.....	41
4.2.1 VARIAÇÃO DA TENSÃO.....	43
4.2.2 DOBRAMENTO APÓS A APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO	43
4.2.3 MATERIAIS ANALISADOS	44
5 CONCLUSÕES	51
6 SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

Aspersão térmica se entende como o processo onde partículas fundidas, semifundidas ou sólidas são lançadas e depositadas em forma de spray sobre um substrato, no qual resulta em um revestimento sobre o mesmo. O material a ser depositado pode estar na forma de pó ou arames. A aspersão térmica necessita de uma fonte de calor, podendo ser uma chama ou um arco voltaico, para realizar a fusão do material a depositar. Como o material é aquecido, tende a se tornar fundido, semifundido ou, até mesmo, com algumas partículas sólidas e é acelerado a partir da vazão de um gás ou ar comprimido.

Nos dias atuais, as empresas vêm investindo e inovando a cada dia, por melhoria contínua no seu processo, no qual possibilita melhores resultados, melhor qualidade, eficiência e com baixo custo de produção. Sendo que muitas vezes estes componentes passam por processos relativamente de alto custo, para terem uma melhor dureza ou acabamento superficial e ter capacidade de suportar situações mais severas em sua rotina de trabalho, ou até melhores durabilidades quando expostas ao tempo. Entretanto buscou-se realizar processo de aspersão térmica por arco elétrico com alumínio em diferentes tipos de materiais, nos quais foram analisados fatores como, acabamento na parte superficial da peça e aderência, identificando como obter um melhor aproveitamento deste processo nas indústrias. Os revestimentos depositados por aspersão térmica são aplicados para a proteção contra a corrosão, principalmente o alumínio, pois este confere à superfície do aço, predominantemente proteção por barreira, impedindo o contato do aço com o meio corrosivo.

No entanto a implementação do dispositivo de aspersão térmica por arco elétrico, justifica-se por apresentar algumas vantagens, como maior taxa de deposição de material, valor do equipamento relativamente baixo em relação aos demais e pouca manutenção. Também se podem aplicar diversos tipos de material de adição para fazer os revestimentos, este material de adição é projetado sobre o substrato com a utilização de ar comprimido.

No presente trabalho desenvolveu-se um estudo com alumínio depositado por aspersão térmica a arco elétrico para a obtenção de resultados de aderência e acabamento depositado em superfícies de: alumínio, aço inoxidável, aço SAE 1020, amianto, refratário, cobre e bronze, com a finalidade de se obter um revestimento

com alta resistência à corrosão. Para projetar as partículas sólidas de alumínio foi utilizado apenas ar comprimido, a uma pressão constante de 6 bar. Para fundir o material a ser projetado é utilizado uma fonte de soldagem e dois alimentadores com seus acessórios, onde estão ligados no polo positivo e negativo do retificador de solda, com a finalidade de fechar arco elétrico, para a fundição do material de adição.

Como o objetivo principal é de projetar um dispositivo para aspersão térmica por arco elétrico, através de uma fonte de solda MIG/MAG, o projeto do dispositivo consiste em fixar duas tochas de soldagem que permanecem alinhadas entre si com a finalidade de formarem arco elétrico entre os arames que estão sendo alimentados, assim sendo possível a fundição do material de adição. Deve-se ter um acionamento de ambas as tochas no mesmo instante. No processo de aspersão térmica com fonte MIG/MAG, serão feitas algumas análises, com comparativos, onde será variada a tensão, velocidade do arame, distância entre a tocha e o substrato e a pressão do ar comprimido, com isso buscou-se compreender melhor sua aplicação e quais os casos que devem ser aplicados na indústria metal mecânica.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura é uma parte de extrema importância durante o estudo, pois envolve localizar, analisar, sintetizar e interpretar o que já foi pesquisado e publicado sobre o tema. A revisão da literatura é indispensável não somente para definir o problema, mas também para obter uma ideia precisa sobre o estado atual do conhecimento sobre o assunto. Portanto, a revisão da literatura é muito importante para adquirir conhecimentos básicos e teóricos para se começar o estudo sobre revestimentos de aspersão térmica por arco elétrico.

2.1 ORIGEM DA ASPERSÃO TÉRMICA

Existem referências históricas que mostram que em 988 a.C. já existia a utilização de recobrimentos metálicos decorativos, onde folhas de ouro muito finas eram aderidas através de adesivos a outras superfícies, com o objetivo de recobri-las. A partir deste conceito a imersão de uma peça metálica em outro metal fundido foi um dos processos que se seguiram até a atualidade (COUTO, 2006).

É remota a ideia de recobrir superfícies de peças, pois tem objetivo principal de protegê-las, ou alternar suas propriedades. Em 1882 na Alemanha, já se empregava chumbo fundido vazado sobre um jato de ar lançado contra chapas metálicas, com a intenção de produzir acumuladores (MACHADO, 1996).

Para Paredes (2000) a aspersão térmica é um dos processos químicos mais antigos, porém aspersão térmica só foi possível em 1896, onde a mesma foi criada por Max Ulrich Schoop, com a intenção de proteger e revestir contra corrosão de estruturas metálicas, mas somente a partir de 1930, os Estados Unidos investiram no processo em larga escala, com a finalidade de recuperação de componentes em geral, além da proteção contra a corrosão já presente em suas primeiras aplicações.

Em 1911, o processo de aspersão térmica permitiu seu posterior emprego industrial, onde foram alcançadas experiências com um pequeno canhão de projéteis de chumbo para cobrir uma superfície. Na época, também se notou que a qualidade do revestimento estava relacionada com a energia cinética das partículas e que havia uma velocidade limite para a mesma, acima da qual a junção não se realizava, ou era incerta. Contudo, talvez sua maior contribuição tenha sido o esclarecimento de que era possível projetar metal pulverizado através da chama

lançada numa tocha e levar o mesmo ao estado pastoso, ou seja, semifundido, dessa forma atingindo um perfeito revestimento (MACHADO, 1996).

Couto (2006) fala que, em 1910, construíram processos que empregavam o metal fundido na forma de pó. Dois anos após, em 1912, foi lançado um equipamento que utilizava matéria-prima em forma de arame metálico, que era fundido e transformado em “*spray*” através de chama oxiacetilênica, direcionado contra a superfície a ser revestida. Em seguida, alguns aperfeiçoamentos foram surgindo obtendo algumas uniformidades na chama, com alimentação contínua do arame e segurança na operação.

Ainda, Couto (2006) explica que se desenvolveram duas novas fases de maior desenvolvimento no processo, a primeira foi durante a 2ª Grande Guerra Mundial, quando a matéria-prima estava escassa, ainda necessária, encontrava neste processo uma forma de redução de custos e tempo de reaproveitamento de peças e componentes. Na segunda fase, contemporânea, à chamada Guerra Fria, notou-se um acelerado desenvolvimento nas pesquisas de materiais e processos ligados à corrida aeroespacial.

Em 1940 foi criado o primeiro modelo de pistola com alimentação por dois arames e calor gerado por uma diferença de potencial (d.d.p). Já nos anos 60, apareceram os processos de arco plasma e posteriormente os por detonação. Já na década de 80, surgiu o processo de aspersão térmica hipersônica (HVOF), que permite transferência de partículas em altas velocidades (TERRES, 2006).

2.2 ASPERSÃO TÉRMICA

Segundo Paredes (2009), o processo de aspersão térmica consiste em uma tecnologia composta de múltiplos processos, a qual é dirigida principalmente para a proteção de superfícies contra o desgaste ou corrosão pela deposição de revestimentos.

Terres (2006) diz que o processo de aspersão térmica consiste em um grupo de processos, nos quais partículas são divididas em micropartículas de materiais para revestimentos. Os revestimentos podem ser metálicos ou não metálicos, os mesmos são depositados sobre um substrato devidamente preparado, na condição fundida ou semifundida, para formar uma camada superficial. As principais características da Aspersão Térmica são esquematicamente apresentadas na

eles são alterados para um estado plástico ou fundido e são confinados e acelerados por um fluxo de gás comprimido para o substrato. A ligação entre o substrato e o revestimento pode ser química, mecânica ou metalúrgica, ou uma combinação destes. As propriedades do revestimento aplicado são dependentes do material de alimentação (BHATIA, 1999).

A aplicação de revestimentos vem ganhando destaque, em aplicações contra desgaste e restauração de certas dimensões de um componente que sofreu desgaste. Os revestimentos podem ser efetuados por diversas técnicas e processos de aspersão, (LIMA; CAMARGO; MARQUES, 1998).

Machado (1996) explica que em qualquer processo que ocorre união entre materiais, a superfície que será revestida deverá estar perfeitamente limpa, sem a existência de óxidos e devidamente preparada com as técnicas de aplicação dividindo-se entre as seguintes: (a) o revestimento protetor é aplicado diretamente sobre a superfície, sendo que a mesma deve possuir uma grande rugosidade para facilitar sua fixação; (b) o revestimento após ter sido aplicado, é refundido (usualmente com uma tocha) sendo menos grosseiro que na situação anterior; (c) é aplicado um pré-revestimento, cujo principal objetivo reside em melhorar o ancoramento do revestimento final. No entanto a qualidade do depósito é em função do método de aplicação, materiais envolvidos e condições gerais em que a pulverização térmica foi efetuada.

Os substratos, sobre os quais os revestimentos termicamente aspergidos podem ser aplicados, incluem metais, óxido cerâmicos, vidros, a maioria dos plásticos e madeiras. Nem todos os materiais de aspersão podem ser aplicados a qualquer tipo de substrato. Uma preparação adequada deste é necessária antes da aspersão propriamente dita (PADILHA, 2005).

Entre as principais vantagens do processo de aspersão térmica para o tratamento preventivo contra a corrosão, estão as camadas anticorrosivas aplicadas no processo que podem atuar fornecendo uma blindagem à superfície exposta, isolando-a do meio agressivo e protegendo-a galvanicamente, quando a camada protegida sofre uma lenta e gradativa redução na sua espessura, visando proteger a estrutura revestida contra a degradação, ampliando a vida útil do componente revestido. Para determinar os materiais aplicados, equipamentos utilizados, espessuras depositadas, selagens complementares deve-se fazer uma análise em

função do ambiente ou do tipo de produto que entra em contato com o substrato (COUTO, 2012).

A temperatura da chama oxiacetilenica é cerca de 3100°C, enquanto o arco elétrico e o plasma alcançam temperaturas entre 8.000°C e 25.000°C, ou até mais, dependendo da situação. A velocidade de impacto das partículas pode variar num grande intervalo, em torno de 80 m/s para o método de chama com pó, até cerca de 1000 m/s no de combustão continua (MACHADO 1996).

2.2.1 Preparação da superfície

Após a escolha do processo de aspersão e do material, a próxima etapa a ser feita é a preparação da superfície que serve para garantir uma boa qualidade de adesão do revestimento, na qual o principal mecanismo que é a ancoragem mecânica. O procedimento adequado para preparar o substrato tem a finalidade de permitir que as partículas propelidas tenham no momento do impacto, a máxima aderência. A aderência à superfície depende de quatro etapas, limpeza, rugosidade da superfície, camada de ligação, pré-aquecimento (MARIANO et al.2007):

2.3 MÉTODOS DE ASPERSÃO TÉRMICA

As principais vantagens da aspersão térmica para um tratamento preventivo contra a corrosão, “são as camadas anticorrosivas aplicadas pelos processos de aspersão térmica, também conhecida por metalização, que podem atuar através de duas formas: fornecendo uma espécie de blindagem à superfície exposta, assim protegendo-a, quando a camada protetiva sofre lenta e gradativa redução de sua espessura, o processo visa a proteger a estrutura revestida contra a degradação, desta maneira aumentando a duração do componente”, comenta Couto (2011).

Os métodos de aspersão térmica vêm ganhando espaço com o passar dos anos, em aplicações contra corrosão, desgaste, entre outras. Os métodos de aspersão térmica mais utilizados são: aspersão por chama a gás, aspersão por detonação, aspersão por combustão continua, aspersão térmica de HVOF, aspersão por plasma, aspersão por arco elétrico (LIMA et al. 1998).

Embora outros processos de Metalização por Aspersão Térmica possam ser utilizados para aplicações contra a corrosão, ainda o processo por chama a gás e por arco elétrico são os principais e os mais utilizados (MONTEIRO, 2012).

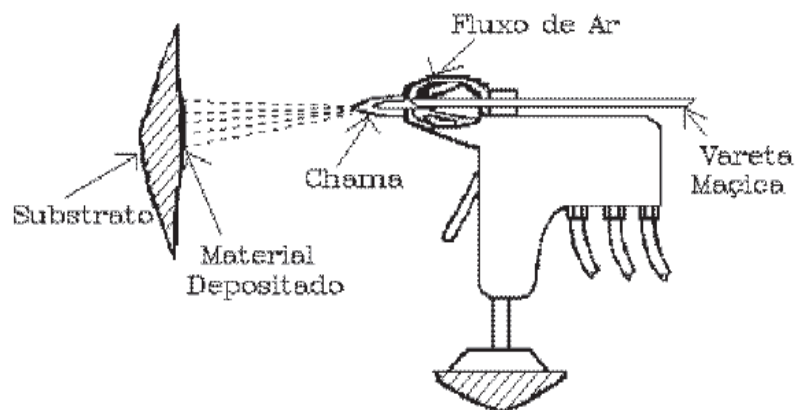
2.3.1 Aspersão por chama a gás

A velocidade de deslocamento das partículas é geralmente subsônica, portanto, a aspersão por chama a gás possui o calor necessário para o aquecimento dos consumíveis obtido desde a combustão na tocha. O gás utilizado neste processo pode ser uma combinação de oxigênio com um dos seguintes gases: propileno, acetileno, propano, gás natural, hidrogênio, mistura estabilizada de metilacetileno com propadieno (MACHADO, 1996). A pulverização por chama pode ser dos três tipos a seguir: arame ou varetas; cerâmico; e tipos de pós.

Na aspersão com arames ou varetas, o arame é alimentado coaxialmente com o bocal da chama, a qual tem somente a função de fundir o material consumível, com a pulverização realizada por ar comprimido, ou um gás inerte em certas aplicações.

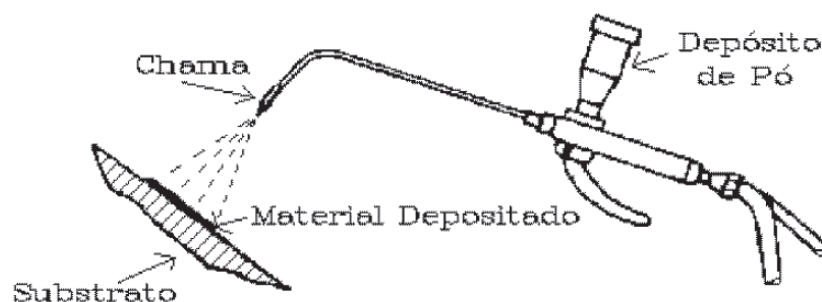
Na aspersão com cerâmicos, pode ser vareta maciça, ou tubo plástico. Para tubos de material plástico preenchidos em seu interior com cerâmicos, a instalação é bem similar a anterior. Já em varetas maciças de cerâmicos a tocha, pode ser visualizada na Figura 2, se observa que uma vareta é adicionada junto à chama fazendo a fundição do material.

Figura 2: Aspersão térmica por chama, com vareta como material de adição.



Na aspersão com Pós, a simples modificação de uma tocha para soldagem oxigás pode permitir a pulverização por pó, como mostra a Figura 3. A pulverização é normalmente realizada sem auxílio de ar comprimido, sendo pequena a taxa de deposição e grande a porosidade do depósito. Esta tocha é de baixo custo, sendo uma opção para materiais que podem ser refundidos após terem sido depositados.

Figura 3: Tocha de alta para aspersão térmica com pó.



Fonte: Machado, 1996.

O processo por chama a gás consiste em um metal em forma de arame ou pó que se funde através do calor da chama gerada pela queima dos gases combustíveis (acetileno ou gás natural) e oxigênio. Através de um forte jato de ar comprimido as partículas fundidas são pulverizadas chocando-se contra a superfície da peça, previamente preparada (MONTEIRO, 2012).

2.3.2 Aspersão por detonação

O pó é alimentado em uma espécie de canhão através de nitrogênio em baixa pressão, posteriormente uma mistura explosiva de oxigênio e acetileno é introduzida nesse canhão, sendo detonada (pela faísca de uma vela de ignição, por exemplo) logo após um jato de nitrogênio explode restos que tenham permanecido no interior do mesmo, este ciclo se repete cerca de 6 a 8 vezes por segundo (MACHADO, 1996).

2.3.3 Aspersão por combustão contínua

Este método compete com o de detonação, o recipiente pó opera em leito fluidizado, com o gás de arraste, normalmente nitrogênio, sendo que após a introdução do consumível na câmara, a mistura combustível (geralmente oxigênio com hidrogênio, ou propileno) se encarrega de aquecê-lo e transporta-lo até o substrato (MACHADO, 1996).

2.3.4 A aspersão térmica HVOF “*High Velocity OxyFuel Flame*”

Takimi et al. 2004 explicam que HVOF, em português, Aspersão Térmica Hipersônica, consiste em um processo de deposição altamente empregado nas indústrias, como aeronáutica, aeroespacial e petroquímica. Devido as excelentes propriedades de resistência ao desgaste, corrosão e adesão ao substrato. No processo, o material a ser depositado encontrasse na forma de pó, que é injetado em uma chama de alta velocidade. As partículas são aquecidas e projetadas em alta velocidade contra uma superfície previamente preparada, onde após o impacto e deformação das mesmas levam a formação e adesão do revestimento ao substrato. Devido às altas velocidades de impacto neste processo, os revestimentos possuem porosidade extremamente baixa (tipicamente menor que 1%) e elevada força de adesão em relação aos processos de aspersão térmica convencionais.

A aspersão térmica HVOF ainda é um processo pouco difundido no Brasil, principalmente devido ao seu alto custo do processo, mas também este processo é o mais eficaz, que apresenta melhores resultados de deposição e acabamento (TAKIMI et al. 2004).

2.3.5 Aspersão por plasma

A pulverização por plasma foi desenvolvida á partir de exigências apresentadas pela indústria aeroespacial, quando se viu a necessidade de revestimentos de alta qualidade com certos carbonetos e óxidos que são necessários para turbinas e motores de foguetes (MACHADO, 1996).

O processo de pulverização térmica por plasma é um processo que permite o revestimento de superfícies com uma camada relativamente fina a partir da

pulverização de pó de materiais cerâmicos ou metálicos. Muito requerido pelas indústrias químicas e de geração de energia (OLIVEIRA, 2001).

Segundo Machado (1996) os gases mais utilizados são: nitrogênio, argônio, hélio, hidrogênio.

Ainda Oliveira (2001) explica que no processo utiliza-se argônio com 99,99% de pureza para correntes acima de 20 A. O custo do gás é relativamente baixo e é encontrado com facilidade no comércio. Em correntes inferiores a 20 A é exigido um gás de maior pureza (99,995%) devido à característica de maior sensibilidade do processo.

O modo empregado na produção do plasma não é transferido, ou seja, o arco elétrico é formado entre o eletrodo negativo, geralmente de tungstênio, e o bocal refrigerado por água. O intervalo usual de corrente se situa na faixa de 100 a 1000 A, com potências desde 40 KW a 100KW, e diâmetro médio das partículas do pó entre 0,02 e 0,1 mm (MACHADO, 1996).

2.3.6 Aspersão por arco elétrico

Na maioria das vezes este é o método mais econômico de pulverização térmica para a aplicação de revestimentos nos metais resistentes à corrosão, incluindo alumínio, zinco e suas ligas. Os custos de energia neste processo são mais baixos e as taxas de produção são mais altas do que nos demais. O gás utilizado no processo normalmente é ar comprimido, dois fios são continuamente alimentados para a pistola ou tocha a uma velocidade uniforme. Um sistema de alimentação de arame, uma fonte de ar comprimido, e uma pistola de pulverização de arco. Os revestimentos pulverizados de arco apresentam excelente adesivo e resistência coesiva (BHATIA, 1999).

Este processo é também conhecido por ASP (Arc Spray Process), o processo a arco elétrico utiliza o calor gerado a partir de um arco elétrico para realizar a fusão do material que será depositado (TERRES, 2006).

A quantidade de depósito é controlada por alguns fatores principais como: distância do bocal, diâmetro médio da partícula, tipos de gases empregados e vazão dos mesmos (MACHADO, 1996).

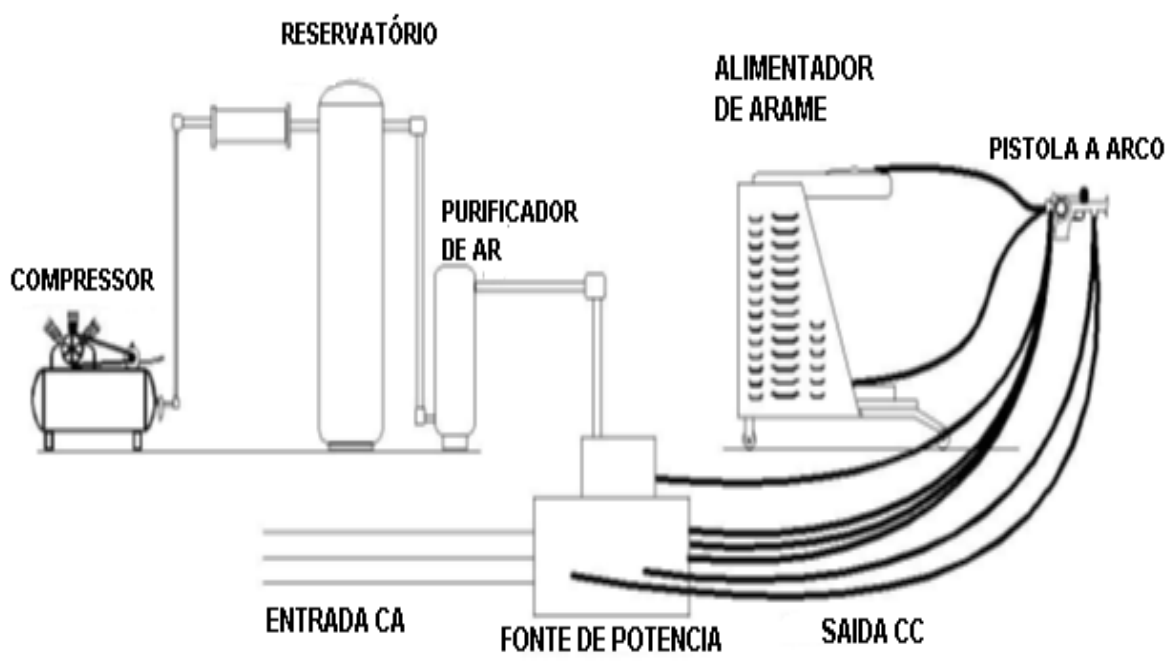
Conforme Paredes (2009), com este processo obtêm-se maiores temperaturas que no processo por combustão, resultando em propriedades

mecânicas superiores. O processo possui algumas vantagens como economia, pois reduz tempo de aplicação e utiliza energia elétrica e não gases (oxigênio e acetileno).

Ainda para Paredes (2009) os principais materiais aplicáveis são o alumínio, zinco, aço carbono, bronze, cobre, aço inoxidável, níquel, bronze e alumínio. As aplicações são as mesmas utilizadas no processo oxiacetilênico, salvo alguns materiais como, por exemplo, o molibdênio. Também pode reduzir a oxidação para aproveitamentos especiais, onde gases inertes (argônio e hélio) podem ser usados para substituir o ar comprimido.

Na Figura 4 são mostrados os componentes normais de um equipamento a arco elétrico como: fonte de voltagem constante, retificador de corrente DC / suprimento de energia; suprimento de ar comprimido; alimentador de arame consistindo de motor elétrico ou acionado a ar, roda motriz e dispositivo tensionado da roda motriz; pistola de arco elétrico consistindo do corpo da pistola, bocal de ar e capa de ar; mangueiras e cabos.

Figura 4: esquema de uma instalação para aspersão termica de arco elétrico.



Fonte: Adaptado Paredes, 2009.

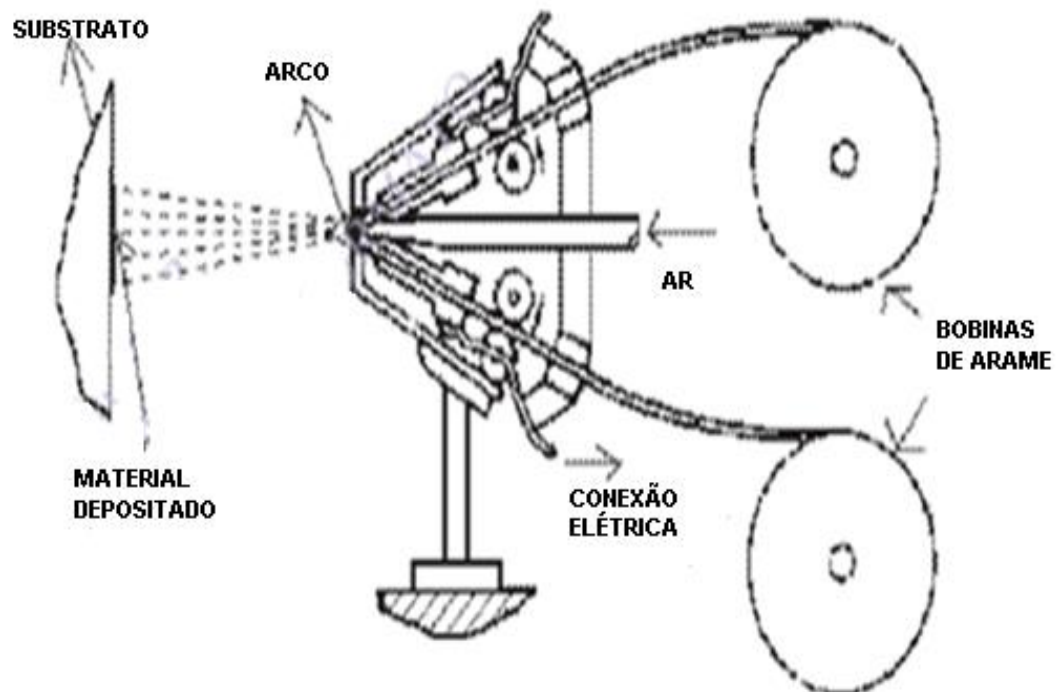
Neste processo, o arco elétrico é obtido no bico da pistola que recebe dois arames (condutores elétricos) do material de deposição. Cria-se entre os dois uma

diferença de potencial, abrindo o arco elétrico que funde ambos os arames. Um sistema mecânico ou elétrico traciona os arames continuamente, ao mesmo tempo em que um forte jato de ar comprimido é dirigido à região de aplicação com a finalidade de pulverizar o metal fundido contra a superfície da peça (MONTEIRO, 2012).

No entanto, Monteiro (2012) ainda fala que metalização ou aspersão térmica a arco elétrico é um processo de metalização mais versátil que os demais, pois permite a opção da utilização de mais de 50 tipos de ligas distintas, garantindo à adequação correta do revestimento as condições operacionais do equipamento.

Machado (1996) diz que arames alimentados desde bobinas distintas formam um arco elétrico entre si, utilizando um jato de ar comprimido, ou outro gás, pulverizando o material fundido, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5: Aspersão térmica por arco elétrico.



Fonte: Machado, 1996 p.366.

Terres (2006) explica as principais características e parâmetros do processo de aspersão térmica por arco elétrico, são apresentadas nas Tabelas 1 e 2 a seguir:

Tabela 1: Características do processo de aspersão térmica a arco elétrico.

Características	Exemplos
Arames	Todos os tipos (sólidos e tubulares) que sejam condutores elétricos. Diâmetros comuns entre 1,6 e 5 mm
Potência elétrica	5-10 kW
Temperatura do arco	4000-6000°C
Velocidade das partículas	Até 250 m/s
Deposição	50-300g/min

Fonte: Adaptado de Terres, 2006.

Tabela 2: Parâmetros comuns do processo de aspersão térmica à arco elétrico.

Parâmetros	Exemplos
Distância de deposição	50-200 mm
Pressão do gás	0,2-0,7 MPa
Tensão	18-40V
Corrente	Até 300A
Limpeza da superfície	Sa3
Preaquecimento	Em média 120-150°C

Fonte: Adaptado de Terres, 2006.

O comprimento do arco elétrico e o tamanho das gotículas tendem a aumentar com a elevação da diferença de potencial e de arames. Esta deve ser mantida em valores mínimos compatíveis com a estabilidade do arco, para obterem-se revestimentos de melhor acabamento (PADILHA, 2005).

2.3.7 Parâmetros do processo.

A qualidade do revestimento aplicado está relacionada a alguns parâmetros, tais como gás de arraste, avanço do arame e corrente elétrica, tensão, distância de

aspersão, preparação da superfície, entre outros. Portanto é necessário conhecer estas variáveis para fazer o procedimento adequado para a aplicação do revestimento, estas variáveis serão explicadas a seguir individualmente.

2.3.7.1 Gás de Arraste

Geralmente usa-se o ar comprimido como gás de arraste das partículas. O ar oxida as partículas resultando em um alto nível de óxidos no revestimento aplicado. Uma grande quantidade de óxidos geralmente degrada a qualidade do revestimento, a vantagem é que geralmente aumenta a dureza, mas afeta a adesão com o substrato. O ar gera o risco de acréscimo de porosidade e, como consequência, a redução da resistência à corrosão em meios líquidos e gasosos, que facilmente atravessam o revestimento atingindo o substrato. Ainda, o ar causa uma excessiva remoção de elementos de liga (por exemplo, C, Si, Mn e Cr) contidos no arame, que serviria para dar ao revestimento uma determinada composição que não será produzida (TERRES 2006).

As altas temperaturas e pressão do gás de arraste também são responsáveis por uma melhor aderência do revestimento que esta sendo utilizado, atingindo-se valores até 70 MPa para alguns materiais, em geral a pressão aproximada é entre 28 e 41 MPa para metais ferrosos (NOVICKI, 2008).

As partículas fundidas dos arames são lançadas por ar comprimido a velocidades a partir de 100 m/s sobre a superfície de uma peça, revestindo-a contra o desgaste ou recuperando o seu dimensional. É um processo à frio, permitindo que a peça não sobreaqueça, conservando suas características metalúrgicas e evitando distorções (CASTOLIN, 2013).

2.3.7.2 Avanço do Arame e Corrente.

O avanço do arame e a corrente elétrica estão diretamente relacionados, pois o aumento de um resulta no aumento de outra. A maioria das máquinas de aspersão a arco elétrico permite a regulagem apenas da velocidade de arame, ficando a corrente elétrica dependente dessa regulagem. O aumento da corrente resulta no aumento do avanço do arame. Estudos mostram que, o aumento da corrente

aumenta a resistência entre camadas do revestimento. Além disso, elementos de liga sofrem maior fusão com o lento avanço do arame (TERRES, 2006).

2.3.7.3 Tensão

Machado (1996) explica que a tensão de trabalho situa-se entre 18 v e 24 v, com o arame conectado ao polo negativo sendo aquecido a uma mais alta temperatura do que o positivo, desta forma fundindo, portanto, numa maior taxa e projetando partículas muito menores que o método anterior.

No entanto Paredes (2009) comenta que no processo de aspersão por arco elétrico a fonte de calor é um arco elétrico obtido no bico da pistola com a junção de dois arames metálicos, assim provocando um arco elétrico, fazendo com que seja fundido o material de aplicação. A ddp (diferença de potencial), que é gerada no bico de contato, está entre 19 a 40 V (Volts).

Terres (2006) fala que, para um dado material, o valor da voltagem afeta, principalmente, a estabilidade do arco. Para arames de alumínio, a melhor voltagem é de, aproximadamente, 25V, o que proporciona uma operação com arco estável, mas aumentando-se esse valor para algo como 30V ou 35V, o arco torna-se instável. Da mesma forma, para arames de aço inoxidável, tem-se boa estabilidade com valores de 30V, tornando-se menos estável em altas voltagens de 35V e 40V.

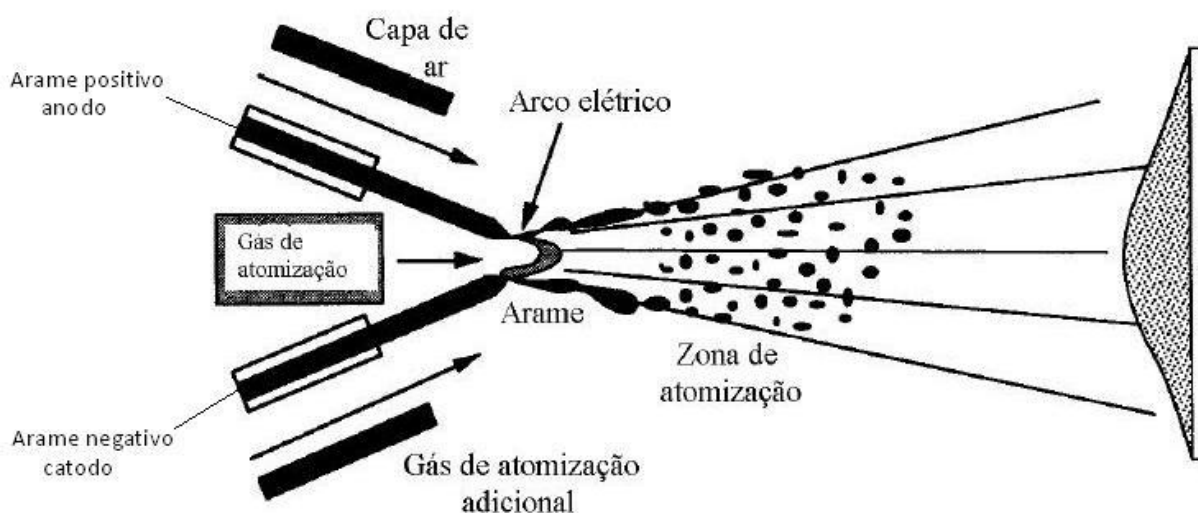
2.3.7.4 Distância de Aspersão.

A taxa de fusão de elementos de liga e a eficiência de deposição estão relacionadas com o aumento ou redução da distância de aspersão, esta distância de aspersão é o ponto onde ocorre o arco elétrico até o substrato. Entretanto a resistência do revestimento tende a ser maior e a porosidade menor a menores distâncias de aspersão. Normalmente existe uma distância ideal para cada caso. Como por exemplo, para aços carbono depositados à corrente de 150A, a resistência entre camadas aumenta de 62 N/mm² para 122 N/mm² com a diminuição da distância de aspersão de 195 mm para 40 mm (TERRES, 2006).

Conforme Tecbrás (2013) este é um processo de aspersão térmica que a liga fundida é projetada na peça que é mantida a uma temperatura média de 200 °C, evitando distorções e alterações metalúrgicas. A combinação da alta temperatura e

velocidade das partículas produz revestimentos de alta aderência, deposição e alta densidade. É um processo onde a peça ou substrato não aquece, conservando suas características metalúrgicas, como mostra a Figura 6.

Figura 6: Desenho esquemático do processo de aspersão térmica por arco elétrico.



Fonte: Paredes, 2009.

A metalização por aspersão térmica é obtida através da projeção de micro partículas de um determinado material, com altíssimo impacto sobre uma peça ou superfície, associando-se alta velocidade de ar comprimido, temperatura com força de aderência ao material base, com isto, é possível formar desde camadas muito finas (0,05 mm) até espessuras maiores de (10 mm), (MONTEIRO, 2012).

A combinação de altas temperaturas com velocidades baixas provoca maior teor de oxidação e porosidade, mas que podem ser controladas pela escolha correta dos parâmetros, como corrente (contínua), pressão do gás de arraste, pressão do ar secundário (responsável por evitar que as partículas se aglomerem), tensão e taxa de alimentação dos arames, bem como as próprias a todos os processos (NOVICKI, 2008).

No entanto Castolin (2013) apresenta algumas de suas vantagens no processo de aspersão térmica por arco elétrico como:

- Aplicações com alta taxa de deposição e velocidade;
- Sistema que mantém constante a alimentação do arame;
- Tocha leve e compacta;

- Aplica arames de 1,6 a 2,5mm;
- Tochas com 5, 10, 10+10 ou 20 metros de distância;
- Traciona com segurança arames de Zinco e Alumínio;
- Ampla gama de ligas para revestimentos antidesgaste;
- Aplicações em todos os segmentos industriais;
- Reveste todos os tipos de metais base;
- Alta taxa de deposição - até 36 kg por hora;
- Alta aderência e densidade do depósito.

2.3.7.5 Aspersão por arco elétrico com alumínio

De uma maneira geral, considera-se que as propriedades do revestimento dos materiais aspergidos com alumínio, ficam mais duros e mais resistentes ao desgaste do que as ligas moldadas ou feitas do mesmo material. Isto é devido à apresentação dos óxidos finos, e a uma combinação de endurecimento pelo resfriamento rápido das partículas aspergidas com o impacto sob o substrato. Resfriar-se de maneira rápida ajuda no endurecimento, pela formação de formas metaestáveis e a formação de grãos finos dentro da partícula (RODRIGUES, 2003).

Também, as propriedades de revestimento aplicadas com alumínio, como material de adição, a porosidade e a força da ligação são tipicamente anisotrópicas, significando que podem variar dependendo do sentido. Por exemplo, o crescimento do grão varia dentro de cada partícula e é baseado no sentido do resfriamento da panqueca.

3 METODOLOGIA

3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS

Os materiais e métodos utilizados são apresentados em três etapas, isto é, a primeira descreve o projeto e funcionamento do equipamento de aspersão térmica desenvolvido no laboratório da FAHOR (Faculdade Horizontina), a segunda apresenta os métodos e materiais necessários para a fabricação de um dispositivo apropriado para o processo, e, por fim, a terceira parte descreve o material de adição e corpos de prova utilizados, e também aplicação do revestimento em processos de fabricação.

Com a finalidade de criar revestimentos em diferentes materiais, procurou-se uma solução economicamente viável para aplicar revestimentos e proteger a superfície dos materiais. Para o processo de aspersão térmica foi projetado um dispositivo e utilizado o alumínio como material de adição, devido a seu baixo ponto de fusão, e a facilidade de encontrá-lo em forma de arame o que facilita a sua aplicação.

O estudo foi feito a fim de identificar a qualidade do revestimento em diferentes tipos de materiais, através do processo de aspersão térmica por arco elétrico, no estudo foi variado alguns parâmetros como: vazão e pressão do ar comprimido, distância de aspersão, e variação da corrente elétrica e tensão.

Estes ensaios foram feitos com a finalidade de se obter maiores informações a respeito do processo aspersão térmica por arco elétrico, principalmente no que se refere à influência da aderência sobre a superfície aplicada, e acabamento assim como diâmetro das partículas projetadas sobre o substrato.

3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

3.2.1 Equipamento de aspersão

Para a aspersão térmica foram utilizados dois alimentadores de arame, modelo SWM-20 da marca solmig, e um retificador de solda solmig VI as quais são apresentadas na Figura 7.

Figura 7: Fonte de potência e alimentadores utilizados no processo de aspersão.



Para o acionamento dos dois alimentadores simultaneamente foi desativado o gatilho das tochas de soldagem, e ambas foram ligadas em paralelo. Também um interruptor foi ligado junto aos alimentadores.

Durante a execução do processo de aspersão térmica por arco elétrico, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Fonte de soldagem MIG/MAG solmig VI 320 - Tem a função de transformar a energia da rede (220 V), que é de baixa corrente e alta tensão, em energia para o processo que é de alta corrente e baixa tensão, assim podendo fornecer os valores de corrente e tensão adequados ao processo.
- Duas tochas MIG/MAG de 3 m cada, sem refrigeração - Tem a função de conduzir e guiar o material de adição (arame de alumínio), fornecer a

corrente elétrica da fonte, com a finalidade de produzir o arco elétrico para a fundição do material.

- Dois alimentadores de arame SWM-20 - A função principal é puxar o arame do carretel até os bicos de contato fazendo com que ocorra o arco elétrico. Os mesmos são puxados por motores elétricos e devem possuir um acionamento e paradas sincronizadas, para manter uma velocidade constante em ambos os aparelhos, para uma aplicação de revestimento uniforme. A velocidade de arame esta diretamente relacionada com a intensidade da corrente.
- Um rolo de arame de Solda MIG Alumínio ER4044 1,0mm 6,5kg - Material de adição em forma de rolo utilizado para o revestimento no substrato.
- Compressor de ar SCHULZ CSL 20 BR/200 I - Deve fornecer ar comprimido, a uma pressão elevada e vazão constante, projetando o material de adição sobre o substrato.
- Válvula solenoide - A válvula solenoide utilizada foi à mesma que se encontra no alimentador SWM-20, porém algumas mudanças foram feitas, como adaptá-la para ser acionada junto com o interruptor de acionamento das tochas, e modificada para ser utilizada com ar comprimido.
- Válvula controladora de vazão de ar com purgador de água - A válvula é instalada ao longo da rede antes do solenoide, tem a função de limitar a vazão máxima de ar através de um sistema roscado que aumenta ou diminui a perda de carga. O conjunto conta com um manômetro que indica a pressão de funcionamento que foi ajustado, a pressão varia de 0 a 10 bar. O purgador tem a finalidade de retirar a água do sistema, pois a mesma pode vir a prejudicar a aderência e a porosidade do material de adição.
- Para a construção do dispositivo foi necessário substituir os conduites espiral 1,00 mm x 3 mm, por conduites nylon teflon para arame alumínio 1 mm x 4,5 m para tocha SU 320/52. A tocha possui consumíveis que deve ser utilizado para a fabricação do equipamento, tais como bico de contato 1 mm, difusor de gás, conduite de 3 m.

Figura 8: componentes utilizados para a fabricação do equipamento de aspersão térmica.



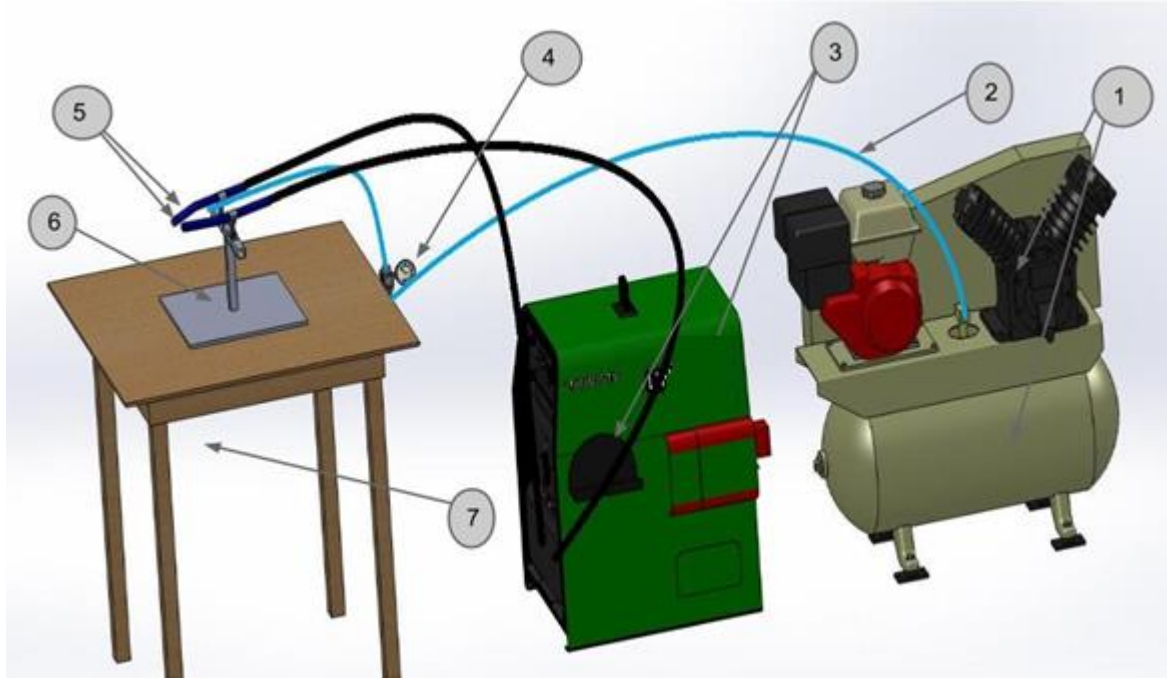
A Figura 8.a até 8.e mostra os componentes utilizados para a fabricação do equipamento, sendo que a Figura 8.a apresenta tochas de solda fixadas ao dispositivo; Figura 8.b bico de limpeza utilizado para projeção do ar comprimido, Figura 8.c válvula de vazão; Figura 8.d alimentadores e arrame; e na Figura 8.e pode ser visto a fonte de potencia utilizada.

A montagem dos componentes descritos na Figura 8 pode ser visualizada na Figura 9, onde é representado por números de 1 a 7 cada item individual, sendo possível analisar como foi feito o processo, pois apresenta seus componentes montados.

O ar armazenado no reservatório é distribuído por mangueiras até o manômetro, que tem a função de controlar a velocidade do ar, que é direcionado até um bico de limpeza que se encontra entre as tochas de solda. As tochas estão fixadas em um dispositivo apropriado sobre uma bancada.

Figura 9: Sistema completo para o processo de aspersão térmica.

- 1) Compressor e reservatório de ar, 2) Mangueira de ar, 3) Fonte de potência e alimentadores de solda, 4) manômetro, 5) Tochas de solda, 6) Dispositivo, 7) Bancada.



3.2.2 Ligação dos alimentadores de arame

Os alimentadores de arame mostrados na Figura 7 foram ligados em paralelos para terem um acionamento ao mesmo tempo. Porém as tochas são acionadas individualmente pelo gatilho representado na Figura 11.b, item 5, no entanto viu-se a necessidade das tochas serem ligadas de uma maneira que se acionavam e paravam juntas. Então foram desativados os gatilhos de acionamento, e posto um interruptor como mostra na Figura 10, onde este interruptor faria o acionamento de ambas às tochas ao mesmo instante, no momento em que o operador decidisse começar o processo de aspersão térmica. O interruptor possui um cabo de 3 m de comprimento.

Figura 10: Interruptor de acionamento.



3.2.3 Fabricação do dispositivo

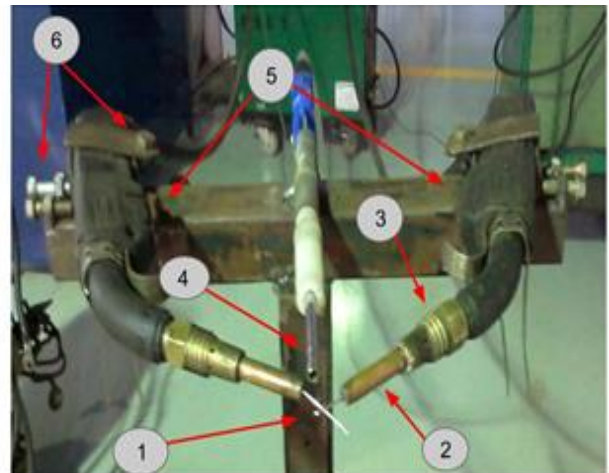
Para a fabricação do dispositivo foram utilizados parafusos, tubos e chapas metálicas fornecidos pelo laboratório de soldagem da FAHOR. Estes componentes foram fixados por meio de soldagem e união móveis, como parafusos e rebites. A Figura 11.a mostra como é feita a fixação das tochas no dispositivo. As mesmas foram ligadas, uma no polo positivo e outra no negativo da fonte de potência.

Figura 11: Tochas montadas no dispositivo de aspersão.

a: Fixação das tochas.



b: Dispositivo detalhado.



Na Figura 11.b as tochas e o dispositivo são mostrados de uma maneira detalhada mostrando seus principais componentes. 1 material de adição em forma de arame; 2 bicos de contato \varnothing 1mm; 3 difusor de gás; 4 bico de ar; 5 gatilho de acionamento; 6 parafusos de ajuste.

A fixação foi feita por meio de abraçadeiras e parafusos M10, a base do dispositivo possui um perfil com secção sextavada. As duas tochas que estão fixadas no dispositivo de aspersão, como mostra na Figura 07, estão ligadas uma no polo positivo e outra no negativo de um alimentador de arame, modelo SWM-20 da marca solmig.

3.2.4 Material de adição e corpo de prova

Para o desenvolvimento do trabalho experimental, o material de base utilizado como substrato foi chapas de alumínio com espessura de 3 mm, chapas de aço SAE 1020. os corpos de prova foram cortados na medida de 100 x 50.

Para a aplicação do revestimento foram retiradas as impurezas, tais como óleos e graxas para uma melhor aderência do substrato, também os materiais não poderiam estar oxidados para fazer o revestimento. Para uma melhor aderência os corpos de prova também foram lixados e limpos com o auxílio de uma escova de aço, como mostra a Figura 12, para aumentar a rugosidade assim tendo uma melhor aderência.

Figura 12: Preparação do substrato.



A Figura 13 mostra todos os materiais que foram revestidos e analisados, os materiais são os seguintes: 1)madeira, 2)cobre 3)bronze, 4)aço SAE 1020, 5)amianto, 6)aço inoxidável, 7)refratário e 8)alumínio. Pois de acordo com Padilha 2005, estas matérias também podem ser revestidos por aspersão térmica.

Figura 13: Materiais analisados.



O item 3 da Figura 13 mostra o aço SAE 1020, a preparação de superfície deste material foi feita com bonderite 1070 e aditivo para limpeza ridosol 1270, este procedimento de limpeza é muito utilizado para preparação de superfície de peças que receberam o processo de pintura. Ambos os produtos são dissolvidos em água e aplicados por imersão da peça ou por jato de água.

3.2.5 Gerador de fluxo de ar

Os primeiros testes foram realizados utilizando um gerador de fluxo de ar Marie da marca Cidepe, mostrado na Figura 14. Sendo que o mesmo fornece um volume de ar constante, mas com baixa pressão. Foi ligado o equipamento no lugar do compressor de ar SCHULZ CSL 20 BR/200 I para fazer as análises iniciais dos resultados de aderência quando submetidos à baixa pressão.

Figura 14: Gerador de fluxo de ar.



Com base nos resultados encontrados durante as análises feitas com o compressor de ar, foi possível definir quais seriam os parâmetros utilizados no equipamento de aspersão térmica. Os parâmetros definidos foram os seguintes:

- Pressão: 6 bar.
- Tensão: 35 V.
- Corrente: 80 A.
- Distância de aspersão: aproximadamente 100 mm.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados são apresentados em duas fases, à primeira consiste no projeto e na fabricação do dispositivo que se adapte ao processo de aspensão térmica por arco elétrico, e na segunda foi estudada a aderência em diferentes tipos de materiais.

4.1 PROJETO E FABRICAÇÃO DO EQUIPAMENTO

4.1.1 Dispositivo para fixação das tochas

Uma das maiores dificuldades durante os ensaios foi identificar qual seria a posição mais adequada para as tochas, pois apesar do dispositivo ter ajustes por parafusos, ele se desalinhava facilmente, devido ao peso das tochas, fazendo com que os arames não tivessem alinhamento, como mostra a Figura 15.a, assim não formando arco elétrico. A solução encontrada foi adicionar ao dispositivo mais um sistema de fixação, onde por meio de duas placas de madeira presas por parafusos, fixadas em paralelo sobre o difusor de gás, como mostra a Figura 15.b., deixou a estrutura mais rígida solucionando o problema.

Figura 15: Posição das tochas de soldagem.

a: Desalinhamento dos arames.

b: fixação por placas de madeira.



4.1.2 Testes iniciais com o equipamento de aspersão térmica

Com base nas análises iniciais, feitas com o gerador de fluxo de ar mostrado na Figura 14, foi possível afirmar que a pressão de ar era insuficiente para uma boa aderência sobre o substrato, já que neste procedimento a vazão de ar não foi variada, pois com um alto volume de ar é possível projetar uma quantidade igual ou maior de material, porém este recurso é inviável, apresentando resultados insatisfatórios, mostram uma baixa aderência sobre a superfície, sendo que era possível com o auxílio de uma espátula retirar o revestimento de alumínio sobre o substrato, como se pode observar na Figura 16 que o mesmo não teve boa aderência.

Figura 16: Revestimento sem aderência retirado do substrato.



Na Figura 16 se pode observar que o material de adição não teve aderência com o substrato, pois se soltava facilmente. Foram feitas diversas análises e em todas elas foi constatado que a falta de aderência está relacionada à baixa pressão, e ao diâmetro do bocal de saída de ar. No entanto, foi decidido que para continuar os experimentos seria necessário utilizar um compressor de ar que fornecesse uma pressão maior de ar, também foi substituído o bocal de saída de ar por um bico de limpeza, que apresenta um diâmetro menor fazendo com que a velocidade do gás aumente.

Outro problema encontrado foi que o arame trancava no condutite espiral da tocha, fazendo com que o mesmo se enrolasse causando o seu rompimento no alimentador, como mostra na Figura 17.

Figura 17: Arame de alumínio enrolado.



Um dos fatores que contribuía para este problema é o ajuste da pressão dos roletes, que devido ao alumínio ser macio e maleável acabava amassando. Porém após o ajuste da pressão dos roletes o problema prosseguiu. Desta maneira optou-se por substituir os condutites espiral por condutites de nylon teflon 1 mm x 4,5 m, que são específicos para solda MIG utilizada para soldar alumínio. As tochas possuem um comprimento de 3 m, sendo assim foi necessário cortar 1,5 m dos condutites teflonados e fazer rosca em sua extremidade. Com a substituição dos condutites o problema foi solucionado, sendo possível uma velocidade de arame uniforme e constante.

4.2 TESTES E ANÁLISES

Para todos os problemas encontrados no decorrer dos ensaios, foi elaborado um plano de ação aonde fosse possível corrigir cada falha individualmente para que o equipamento operasse nas melhores condições possíveis.

Na Figura 18 pode-se observar o equipamento em funcionamento revestindo um corpo de prova, que será analisado para ver se o mesmo apresentou aderência.

Figura 18: Equipamento de aspensão térmica em funcionamento.



4.2.1.1 Variação da pressão

Para verificar a influência da pressão do ar na aplicação do revestimento, foram testadas cinco amostras, onde foi variada somente a pressão do ar comprimido, a tensão utilizada foi de aproximadamente 35 V e corrente de 47 A, como mostra o Quadro 1.

Quadro 1: Testes com variação da pressão.

Variação da pressão			
Amostra	Pressão	Tensão	Corrente
1	4 bar	34,8 V	47 A
2	5 bar	34,8 V	47 A
3	6 bar	34,8 V	47 A
4	7 bar	34,8 V	47 A
5	8 bar	34,8 V	47 A

A influência da pressão de ar, ao contrário do que se esperava nas análises, mostrou uma redução da rugosidade. Nas pressões de 4 a 6 bar o acabamento foi praticamente o mesmo, com pouca alteração, já nas pressões mais elevadas, acima de 7 bar, o acabamento mostrou pequenas formações de salpico. No entanto, os testes feitos em pressões abaixo de 4 bar deixaram a superfície mais rugosa. Com base nas análises, a rugosidade acontece devido a menor pressão de ar, produzindo um menor efeito de resfriamento, e permitindo que as partículas atinjam o substrato sem se fragmentar ou romper, este fenômeno também afeta a penetração do revestimento sobre o substrato, reduzindo sua aderência, portanto deve-se evitar o uso de pressões abaixo de 4 bar, pois podem comprometer a aplicação do revestimento.

Já em pressões muito elevadas a distância de aspersão deve-se aumentar gradativamente com o aumento da pressão, pois em aplicações com distâncias menores que 100 mm, ocorre uma aplicação não uniforme sobre o substrato, deixando o local onde o jato de ar está direcionado com uma espessura maior de material. Em distâncias entre 100 a 150 mm a distribuição se ocorreu de uma forma mais homogênea, melhorando o aspecto visual da peça.

De acordo com os testes realizados, é possível afirmar que a pressão deve ficar entre 4 a 6 bar, para um acabamento mais uniforme.

A corrente elétrica de 47 A, utilizado para os testes, era muito baixa, pois devido a pouca corrente elétrica, instabilizava o arco elétrico, ocasionando pequenos estalos e dificultando a aplicação do revestimento.

4.2.1.2 Variação da corrente

Da mesma maneira que foram feitos testes com a variação da pressão, também foram realizados testes com a alteração da corrente em cinco amostras. O Quadro 2, mostra os valores de corrente e a tensão utilizada. Os valores de corrente utilizados podem ser analisados no Quadro 2.

Quadro 2: Testes com variação da corrente elétrica.

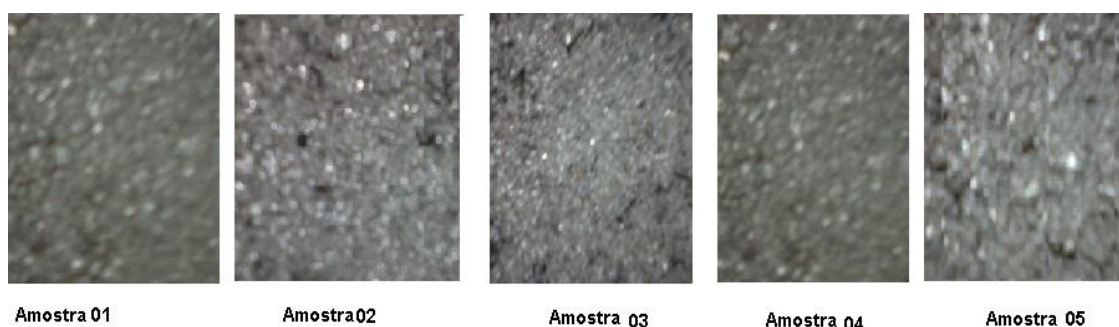
Variação da corrente			
Amostra	Pressão	Tensão	Corrente
1	6 bar	30,5 V	70 A
2	6 bar	30,5 V	80 A
3	6 bar	30,5 V	90 A
4	6 bar	30,5 V	100 A
5	6 bar	30,5 V	110 A

O fator corrente possui uma grande influência no acabamento da superfície, deixando ela mais irregular.

Um dado muito importante levantado durante os experimentos foi que quando a corrente é aumentada, o diâmetro das partículas também aumenta gradativamente. Pois quanto maior for a corrente maior é a quantidade de material fundido.

Na Figura 19 é possível analisar os resultados, as amostras 03 e 04 foram as que apresentaram um melhor acabamento superficial, já a amostra 05 apresenta uma rugosidade um pouco maior, devido à elevada taxa de deposição de material. Nestes casos é recomendável usinar ou lixar a peça para um melhor acabamento.

Figura 19: Testes com variação da corrente elétrica.



No entanto a amostra 05 apresenta uma camada mais espessa de revestimento, pois o aumento da velocidade de arame consequentemente aumenta a corrente. Correntes mais elevadas são indicadas para aplicações que requerem alta taxa de deposição, ou espessuras maiores de revestimento.

A taxa de deposição do material de adição está relacionada à velocidade do arame, sendo que este está diretamente relacionado à corrente elétrica. Pois

quando aumentamos a velocidade de arame estamos também aumentando a corrente que se forma no arco elétrico, que ocorre entre os bicos de contato das tochas de solda. No entanto correntes acima de 110 A são indicadas apenas aplicações que requerem maiores espessuras de revestimento e pouca qualidade no acabamento.

4.2.1 Variação da tensão

Para encontrar a tensão ideal foi utilizada a corrente de 90 A, que corresponde à amostra 03 do Quadro 2, pois foi a que apresentou melhores resultados. A tensão esta diretamente relacionada com a corrente, pois quando se aumenta a velocidade de arame, é indicado que se aumente a tensão também.

A corrente de 90 A foi referência para encontrar a tensão ideal, pois a corrente que passava pelo arco elétrico se manteve constante enquanto a tensão foi variada para mais e para menos. A melhor tensão encontrada para o processo foi de 34 a 37 V, pois foi onde o arco elétrico se manteve mais estável.

Para esta corrente, não é indicado utilizar tensão acima de 40 V, pois as análises feitas com este valor apresentaram a fusão do bico de contato da tocha que estava ligada ao polo negativo da fonte de soldagem, sendo necessária a substituição deste consumível de soldagem.

A tensão tem grande influência no acabamento do revestimento, pois quanto mais elevada for a tensão mais facilmente ocorrerá à fusão do material de adição, ocasionando partículas menores, conseqüentemente melhor acabamento superficial.

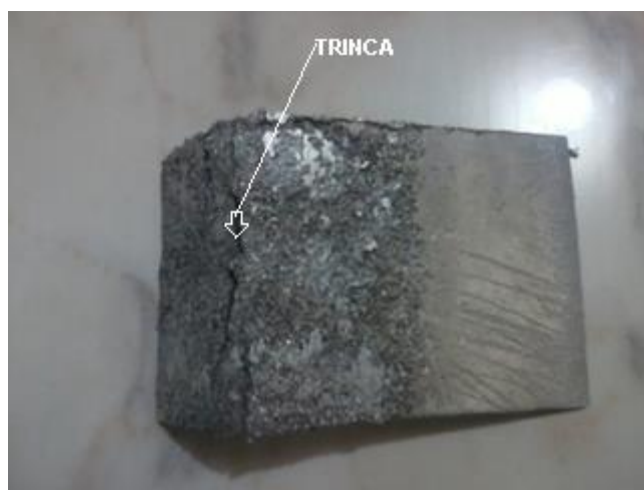
4.2.2 Dobramento após a aplicação do revestimento

Os revestimentos que apresentaram uma boa aderência passaram por um ensaio de dobra. As peças já revestidas foram fixadas a uma morsa de bancada e com o auxílio de um alicate de pressão foi aplicada uma força até a sua deformação plástica.

As dobras foram feitas com um ângulo de aproximadamente 80 graus. Os resultados podem ser resumidos da seguinte maneira: a superfície de todas as

amostras revestidas apresentaram trincas, porém as amostras com espessuras menores apresentaram trincas menores sobre sua superfície. Na Figura 20 pode-se visualizar a trinca ocorrida no ensaio de dobra, esta amostra apresenta um revestimento de 3 mm aproximadamente de espessura.

Figura 20: Teste de dobra.



Apesar de ocorrer trincas nos ensaios por dobramento, os revestimentos aderiram sobre o substrato não apresentando nenhuma possibilidade de se descolar do mesmo. O que comprova que mesmo apresentando trincas superficiais, a aplicação possui uma boa aderência. O revestimento de alumínio também se torna rígido após sua aplicação, assim não é indicado fazer dobras após a aplicação do revestimento.

4.2.3 Materiais analisados

Durante os estudos foram analisados sete tipos de materiais, com características diferentes. Os materiais analisados são os seguintes: madeira, cobre, bronze, aço 1020, aço inoxidável, amianto e refratário, os resultados encontrados nas análises são explicados individualmente a seguir.

A madeira não apresentou resultados satisfatórios como se pode observar na Figura 21, pois o alumínio não aderiu sobre a superfície. Outro ponto negativo foi em sua área de aplicação, a madeira queimou na área de aplicação do revestimento, devido à alta temperatura do material fundido que está sendo projetado sobre a

mesma. No entanto não é recomendável a aplicação do revestimento neste tipo de material, pois há risco de incêndio.

Figura 21: Madeira.



Já o cobre, mostrado na Figura 22, teve aderência ao substrato, porém o revestimento obteve uma camada irregular sobre sua superfície, criando uma espécie de casca, o que reduz a aderência ao substrato, sendo possível remover a aplicação facilmente com a mão, desta forma apesar de haver união entre estes materiais, o mesmo não é indicado para este tipo de aplicação, pois com o passar do tempo o alumínio revestido pode desprender do substrato.

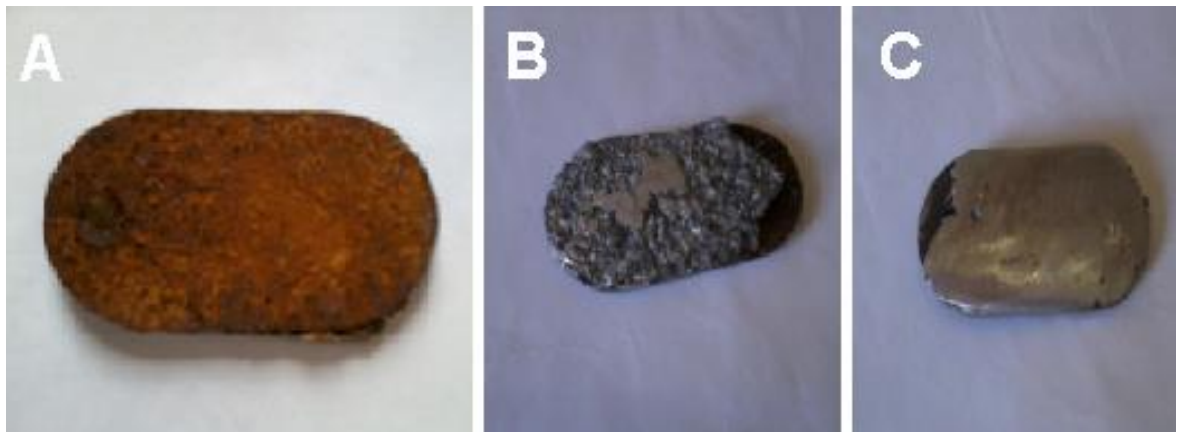
Figura 22: Cobre.



A Figura 23 mostra o aço SAE 1020, as três amostras foram preparadas com bonderite 1070 e ridosol 1270. A amostra da Figura 23.a não passou pelo processo de aspersão térmica, sendo que poucos dias já começou a apresentar pequenos indícios de oxidação. A Figura 23.b e 23.c que foram revestidas com alumínio não apresentou algum sinal de oxidação. A diferença entre a amostra b e c, esta no acabamento, pois na amostra c foi lixada sua superfície para um melhor acabamento.

No entanto apresentou o aço SAE 1020 apresentou resultados satisfatórios, pois aderiu muito bem à superfície. Este tipo de aço é um dos mais utilizados nas indústrias, no entanto, é viável fazer um estudo específico com este material para ver qual é a escala de aplicação deste revestimento em aços com baixo teor de carbono.

Figura 23: Aço SAE 1020.



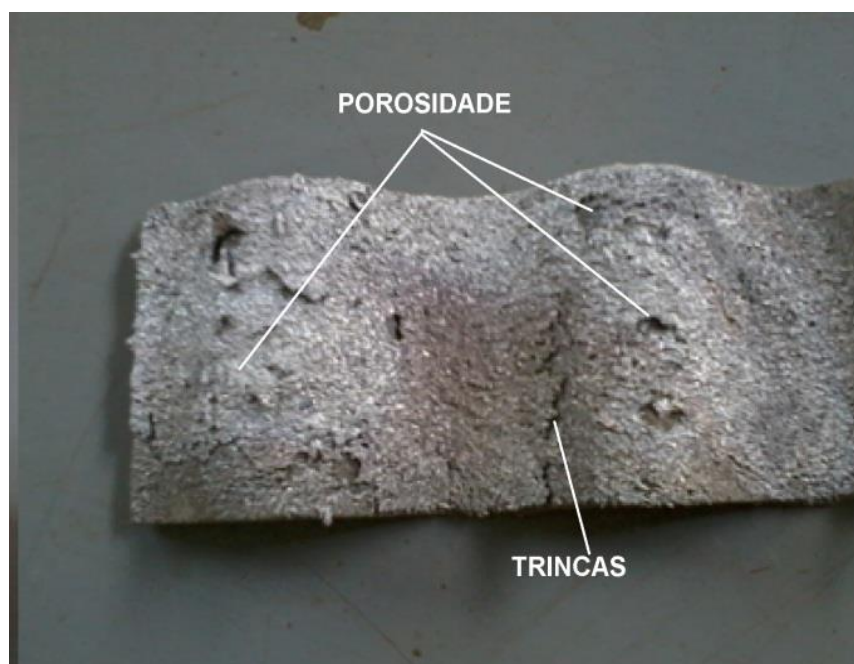
O bronze mostrado na Figura 24 não teve aderência, pois apresentou um comportamento similar ao do cobre, porém no cobre ocorreu uma pequena casca rígida de revestimento e no bronze o revestimento se soltava com a própria pressão do ar comprimido utilizado no processo, no entanto não é possível revestir bronze com este equipamento de aspersão térmica.

Figura 24: Bronze.



Um pequeno pedaço de telha de amianto, mostrado na Figura 25, foi utilizado para as análises, neste ensaio se constatou que o revestimento estufou após a aplicação, criando trincas e grande quantidade de porosidade entre o substrato e o revestimento. Também este tipo de material libera um odor durante sua aplicação, o que pode ser tóxico para a saúde.

Figura 25: Amianto.



O aço inoxidável, que pode ser visualizado na Figura 26, apresentou resultados semelhantes às amostras do aço SAE 1020 e alumínio. Desta forma por meio das análises foi possível verificar que o aço inoxidável também pode passar pelo processo de aspersão térmica a arco elétrico. Pois o mesmo apresenta um bom revestimento e aderência ao substrato.

Figura 26: Aço inoxidável.



O refratário, mostrado na Figura 27, é um material cerâmico, portanto possui propriedades totalmente diferentes dos materiais metálicos analisados, mesmo assim apresentou um bom acabamento e aderência, porém aos poucos durante o resfriamento, o refratário foi apresentando pequenas rachaduras, até seu rompimento. Portanto o revestimento tem boa aderência sobre o refratário, o indicado é fazer análises com outros tipos de materiais cerâmicos já que é possível fazer revestimentos nestes materiais.

Figura 27: Refratário.



O alumínio foi o material que apresentou os melhores resultados, pois teve uma ótima aderência, devido ao material de adição ser o mesmo que o substrato, isto faz com que se conservem as características do material. Este tipo de aplicação deve ser utilizado para a recuperação de peças que sofreram desgaste. Após a aplicação do revestimento é necessário que a peça passe por um processo de usinagem para recuperar o seu padrão de medidas, e melhorar o acabamento. A aplicação do revestimento pode ser vista na Figura 28.

Figura 28: Alumínio.



Dos sete tipos de materiais analisados quatro deles apresentaram bons resultados no processo de revestimento por aspersione térmica por arco elétrico, que foram o alumínio, aço SAE 1020, aço inoxidável e o refratário, assim este equipamento é adequado para revestir estes materiais. Nos demais materiais analisados não se obtiveram bons resultados na aplicação do revestimento, portanto não se indica revestir telhas de amianto, cobre e bronze pelo processo de aspersione térmica por arco elétrico utilizando alumínio como material de adição.

A aplicação do revestimento de alumínio sobre alumínio serve para recuperação de peças que sofreram desgaste excessivo, no aço SAE 1020 serve para proteção contra corrosão, no aço inoxidável para melhorar a condução elétrica e no refratário serve para situações que requerem um bom isolamento térmico e condução elétrica ao mesmo tempo.

5 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos durante os experimentos e as análises realizadas, as seguintes conclusões podem ser retiradas:

- Dos diversos materiais analisados no processo de revestimento por aspersão térmica por arco elétrico, apenas o alumínio, aço SAE 1020, aço inoxidável e refratário tiveram boa aderência, os demais não tiveram boa aderência sobre o substrato, no entanto é necessário alterar os parâmetros para ver se é possível revestir estes materiais. Aconselha-se sempre o aquecimento dos materiais antes da aplicação do revestimento, isso pode melhorar os resultados.
- O revestimento sobre o substrato cerâmico “refratário” teve uma boa aderência, porém após o resfriamento do revestimento, o refratário apresentou rachaduras em sua superfície, vindo a romper-se.
- O alumínio teve pouca aderência sobre o cobre, pois foi facilmente removido após a sua aplicação. Já o bronze não teve aderência com o material de adição. No entanto para este equipamento de aspersão térmica por arco elétrico, o alumínio não é indicado para fazer revestimentos sobre superfícies de cobre e bronze.
- Em telhas de amianto não é indicado fazer revestimentos, pois o não tem aderência com o substrato, e libera um forte odor durante sua aplicação, o que pode ser tóxico para a saúde.
- A amostra de aço SAE 1020 que não foi aplicado o revestimento de alumínio apresentou sinais de oxidação, enquanto as revestidas estavam livres da oxidação, assim sendo indicado o revestimento contra corrosão.
- A superfície das análises com maior tensão apresentou-se mais lisa em relação às baixas tensões, devido a maior facilidade de fundir o material de adição. Porém não é recomendado utilizar tensões muito elevadas próximas a 40 V, pois o bico de contato pode vir a fundir sendo necessário fazer a reposição do mesmo.
- Nos revestimentos depositados por arco elétrico a camada de alumínio está associada principalmente à corrente elétrica. Quando o aparelho opera em

correntes muito baixas, inferiores a 60 A, ocorre à instabilidade do arco elétrico, fazendo com que o material de adição não seja completamente fundido, deixando, assim, durante o processo, a superfície com pequenos restos de material não fundido. Ainda, a corrente elétrica elevada aumenta muito a taxa de deposição do material, o que faz o acabamento ficar mais rugoso, porém com correntes maiores é possível ter melhor penetração do revestimento sobre o substrato devido ao aumento de temperatura que ocorre.

- Todos os revestimentos de alumínio depositados com pressões acima de 4 bar apresentaram boa aderência ao substrato. Portanto não é indicado utilizar pressões abaixo de 4 bar, pois o revestimento pode não ter uma boa aderência sobre o substrato, soltando-se facilmente e sendo necessária uma nova aplicação.

6 SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir são apresentadas algumas sugestões que completam o trabalho feito nesta monografia, e que podem vir a melhorar o desempenho do equipamento.

- Analisar novos materiais para a aplicação do revestimento.

- Analisar outros tipos de materiais cerâmicos.

- Utilizar novos materiais de adição como zinco, cromo, inox etc.

- Realizar melhorias no dispositivo de fixação das tochas.

- Utilizar argônio como gás de arraste, pois pode melhorar o acabamento superficial.

- Fazer análises com o substrato aquecido ao forno em diferentes temperaturas.

- Submeter os revestimentos a ensaios de exposição direta a meios corrosivos.

- Fazer análise em laboratório de desgaste, penetração do revestimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BHATIA, Mr. A. **Thermal Spraying Technology and Applications: Electric processes**. 1999. 91 f. Dissertação de Mestrado - Curso de Engineering And Design, Department Of The Army, Washington, 1999.

CASTOLIN, Eutectic. **Eutronic ArcSpray**: Equipamento de Aspersão Térmica. Disponível em: <http://www.eutectic.com.br/aspersao_eutronic_arcspray.html>. Acesso em: 26 out. 2013.

COUTO, Luís Cláudio de Oliveira. **A metalização como processo de multi-solução. Informetalização**, São Paulo, v. 2, n. 2, p.2, out. 2011.

COUTO, Luiz Cláudio de Oliveira. **Aspersão térmica na construção metálica – Ciência e arte**. CONSTRUMETAL 2006 – Congresso Latino-Americano da Construção Metálica, São Paulo (SP), setembro de 2006.

COUTO, Luiz Cláudio de Oliveira. **Metalização/Aspersão térmica vantagens e aplicações**. Corrosão e Proteção vol 9, n. 44 Nov. 2012.

LIMA, Carlos Roberto Camello; CAMARGO, Flávio; MARQUES, Paulo Villani. **Estudo comparativo das propriedades de revestimentos a base de cobalto aplicado por soldagem e por aspersão térmica**. 24. ed. Fortaleza: Universidade Metodista de Piracicaba, 1998.

MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem e técnicas conexas**:. Porto Alegre: Autor Próprio, 1996.

MARIANO, Carolina; PAREDES, Ramon Sigifredo Cortés; FRARE JUNIOR, Alceu Francisco. **Desenvolvimento de revestimentos de nióbio resistentes a elevadas temperaturas depositados por aspersão térmica**: Aspersão Térmica. artigo científico 4º pdpetro, Campinas, Sp, out. 2007.

MONTEIRO, Eduardo. **Metalização/Aspersão Térmica: Vantagens e aplicações**. Corrosão e Proteção: Ciência e tecnologia em corrosão, São Paulo, v. 9, n. 44, nov. 2012.

NOVICKI, Nilceu. **Aplicação da aspersão térmica na soldagem em operação de tubulações com pequena espessura remanescente**: Arco elétrico. 2008. 177 f. Tese de Doutorado - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

OLIVEIRA, Moises Alves de. **Estudo da soldagem plasma com alimentação automática de arame para aplicação em revestimentos metálicos**: Tipos e vazões de gás. 2001. Dissertação de Mestrado - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis - Sc, 2001

PADILHA, Hélio. **Estudos sobre revestimentos depositados por aspersão térmica para melhorar o desempenho de conexões elétricas**: Aspersão Térmica. 2005. 113 f. Dissertação de Mestrado - Curso de Engenharia E Dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

PAREDES, Ramón S. Cortés. **Aspersão térmica**: Aspersão térmica por arco elétrico. Curitiba: Universidade Federal Do Paraná, 2009.

PAREDES, R. S. C. **Aspersão Térmica**. 01. ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2000. V. 1. 128 p.

RODRIGUEZ, Regina Maria Hartog Pombo. **Formação de óxidos nos revestimentos de alumínio depositados por aspersão térmica**: Aspersão térmica. 2003. 134 f. Tese de Doutorado - Curso de Pós- Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

TAKIMI, Antônio; POSSAMAI, Lisiane; BERGMANN, Carlos Pérez. **Revestimentos depositados por aspersão térmica hipersônica (HVOF) como alternativa ao cromo duro**. Porto Alegre: Departamento de Materiais Escola de Engenharia Ufrgs, 2004.

TECBRÁS, Consumíveis Para Soldagem. **Processo Arco Elétrico**: Revestimento Duro e Metalização.

TERRES, Cristhian José Ferreira. **Avaliação de revestimentos de aços inoxidáveis depositados por aspersão térmica**: Aspersão térmica. 2006. 106 f. Dissertação de Pós Graduação - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.