



## **ESTUDO DOS PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA EM MATERIAIS METÁLICOS DE FORMA A AUXILIAR A APLICAÇÃO DE CAMADAS PARA DIMINUIÇÃO DE DESGASTES E CORROSÕES NA SUPERFÍCIE DO METAL**

<sup>(1)</sup>Thiago Cajaiba de Moraes, thiagocajaibamorais@yahoo.com.br e-mail

<sup>(1)</sup>Adriana Amaro Diacenco, adriana\_aadiacenco@yahoo.com.br

<sup>1</sup>Centro Universitário de Itajubá – FEPI, Av. Dr. Antônio Braga Filho nº 687, bairro Varginha, Itajubá -  
MG

**Resumo:** *O presente trabalho apresenta os processos de aspersão térmica promissores para aplicação de revestimento em materiais metálicos, onde visa melhorar o desempenho das peças metálicas contra a ação corrosiva e desgastes da superfície da mesma. Através de estudos bibliográficos serão mostrados todos os processos de aspersão térmica, iniciando com uma visão geral do processo de revestimento por aspersão térmica, formação de camadas protetoras e suas morfologias, a limpeza do substrato e por fim detalhando e comprando características dos diversos tipos de processos classificados pela sua fonte de energia térmica, combustão e elétrica. Para alcançar o objetivo foram estudados os processos, FS - Chama Convencional (Flame Spraying), HVOF – Chama com alta velocidade (High velocity Oxi-Fluel Spraying) e Dgun – Por Detonação, para os com a utilização energia a combustão, e o processos, ASP – arco elétrico (Arc Spray Process), Plasma e por fim Laser - PROTAL - (Projeção Térmica Assistida por Laser), de forma a auxiliar na aplicação de revestimento de camadas em materiais metálicos.*

**Palavras-chave:** **Aspersão Térmica. Revestimento. Substrato. Ação corrosiva. Desgaste.**



## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente é necessária a utilização de peças metálicas em diversas aplicações da engenharia, no qual são expostas a um ambiente onde a vida útil dos diversos tipos de materiais é de baixos níveis, devido à necessidade de atingir o máximo de desempenho mecânico em sua aplicação. Devido a essa necessidade foi desenvolvido aplicação de revestimento superficial em materiais metálicos por meio de aspersão térmica, proporcionando uma camada superficial de revestimento na qual eleva a resistência das peças contra desgastes e oxidação.

Segundo Brito (2010) defini que o processo de revestimento por aspersão térmica tem sido um dos mais avançados e eficazes processos de revestimento, nos quais foram desenvolvidos grandes variedades de materiais de aplicação para diversos campos de utilização. Para Alencar (2009) a superfície das peças está em uma posição de grande importância para o bom rendimento dos componentes mecânicos, assim tendo que estar protegida através de uma aplicação de revestimento superficial no qual vai evitar ou diminuir os problemas como desgastes prematuros e corrosões. Onde é aplicado o processo de aspersão térmica para revestir matérias, devido a facilidade em aplicar, baixo custo relativo e não é limitado ao tamanho da peças a ser revestida.



Paredes (2009) cita que necessidade de aumentar a vida útil dos materiais é a melhor justificava para aplicação dos processos de aspersão térmica, já que nas maiorias dos casos os custos com a manutenção e substituição das peças ou equipamentos são elevados. O aumento da utilização na aplicação de revestimento através do processo de aspersão térmica dentro do mercado petrolíferos vem sendo cada dia mais procurado, devido à alta concentração de enxofre na exploração de petróleo, o qual danifica o os equipamentos sem camada de revestimento com maior velocidade. Assim com a necessidade de se ter peças e sistemas em condições de operação satisfatória e confiável, visando economia financeira na manutenção e fabricações das peças, são procurados os processos de revestimento por aspersão térmica.

Portanto, conhecendo os benefícios dos processos de aspersão térmica, serão analisados e enfatizados tipos de processos de aspersão térmica, de forma a auxiliar na aplicação de camadas em materiais metálicos, pois Menezes (2007) relata que esse processo atinge o mínimo de deformação siderúrgica do substrato, conferindo a ação protetiva imediata e atingindo uma boa aderência para sua pintura posterior.

Este artigo é composto por três seções. Sendo a primeira a apresentação da introdução, a segunda, o referencial teórico, onde abordam os processos de oxidação e desgaste, preparação do substrato através do processo de jateamento, os seis processos de aspersão térmica, e a terceira seção apresenta as conclusões do trabalho.

## **2. FUNDAMENTOS DA CORROSÃO**

### **2.1. Corrosão**

Corrosão é o processo pode ser definida como o resultado destrutivo de reações químicas e eletroquímicas entre o metal ou ligas metálicas e seu meio ambiente, o metal combinado com



oxigênio e água formam íons  $\text{OH}^-$ , que por sua vez reagem com metal dando origem ao óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) – também conhecido como “ferrugem”. Facilmente são percebidos, pois apresentam características físicas notáveis, que possui uma cor marrom-avermelhada presente em superfícies metálicas (Pereira, 2006).

Economicamente falando, os prejuízos da corrosão dependendo de seu nível de avanço, são incalculáveis, pois geram desperdícios, destroem e contaminam superfícies. Uma estimativa superior a 30% aponta que parte dos materiais metálicos produzidos em todo mundo são para fins de reposição de tal que foram superados pelo processo corrosivo (Nunes e Lobo, 1990).

Segundo Mainer et al. (2004), pode-se dividir corrosão em:

- Eletroquímica: é baseado no processo espontâneo que acontece quando o metal está em contato com um eletrólito, gerando reações anódicas e catódicas simultaneamente. Ocorrem com mais frequência na natureza na

presença de água, formando uma pilha de corrosão.

- Química: tal processo não necessita de água, o que o faz ser chamado de “seco” também. É baseado em um ataque de um agente químico na superfície do material metálico, dispensando a transferência de elétrons de uma região para a outra. Sua ação resulta na perda da rigidez e flexibilidade, ocasionando desgaste e mudanças no seu aspecto.

- Eletrolítica: se caracteriza pela aplicação de uma corrente elétrica externa ao material metálico, o que o torna não espontâneo. Origina-se na deficiência de isolamento ou aterramento de certos materiais. É mais presente em tubulações de petróleo e de água potável, em cabos telefônicos enterrados, em tanques de postos de gasolina. A Figura 1 mostra a fotografia de um ataque corrosivo em materiais metálicos.



**Figura 1. Fotografia de um material metálico com corrosão. Fonte: Pereira (2006).**



## 2.2 Desgaste

É baseado na perda das partículas ou alteração da superfície de substratos, que são provocados pelo contato entre duas superfícies, sendo uma ou outra em movimento (Tylczak, 1992). Bayer (1985) cita que o desgaste pode-se ser dividido em tais processos:

- Desgaste por adesão: ocorre por quando duas superfícies metálicas geram atritos entre si, assim podendo soltar a película de protetora das mesmas.

-Desgaste Abrasivo: Ocorre em meio úmido ou seco. A partícula que se move na superfície é considerada mais dura, rígida seu comparado ao material danificado. Pode ser dividido em desgastes por abrasão em baixa tensão onde as forças aplicadas devem ser baixas para que não ocorra a trituração do abrasivo, o outro desgaste é o abrasão em altas tensões, caracterizado

pela deformação plástica e crateras na superfície do material.

-Desgaste por Erosão: é baseado no processo contínuo de impactos de partículas sólidas sobre uma superfície.

## 2.3 Aspersão Térmica

O processo de aspersão térmica também conhecida como “Metalização”, desenvolvido em 1909 e consequentemente patentado pelo engenheiro M. U. Schoop, consiste em um processo de produção de revestimentos, na qual forma uma camada superficial de proteção na face preparada, como objetivo de proteger materiais metálicos quanto ao seu desgaste excessivo e corrosão. O material aplicado sobre o substrato é elevado ao seu estado de fusão ou próximo por meio de uma fonte de calor gerado no interior ou no bico de uma pistola. Após a fundição as partículas do material são aceleradas através de gases sob pressão até a face preparada onde as mesmas formam camadas em forma de lamelares. Para Brito (2010), qualquer material metálico que não se decomponha ao atingir seu estado de fusão pode ser utilizado com

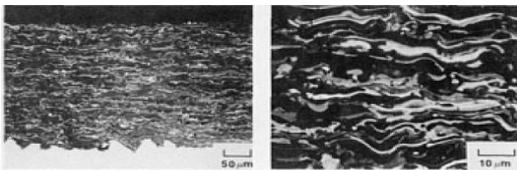


revestimento. A Figura 2 mostra um esquema simplificado do processo de aspersão térmica e a Fig. 3 demonstra a formação de lamelas.

**Figura 2.** Esquema do processo de aspersão térmica. Fonte: Allbiz - Revestimento por Aspersão Térmica, Pinhais.

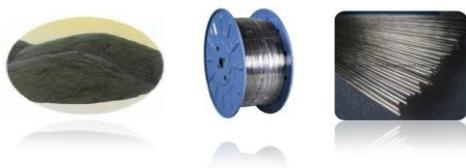


**Figura 3.** Desenho esquemático do processo de aspersão térmica. Fonte: Allbiz - Revestimento por Aspersão Térmica, Pinhais.



Esses materiais podem ser forma de pó, arame ou vareta e são aquecidos por meio de uma pistola ou maçarico. A Figura 4 mostra a forma que materiais de revestimento podem ser encontrados.

**Figura 4.** Tipos de material de revestimento.



A tabela 01 mostra os dados das características técnicas dos metais, nos quais podem ser usados para

revestimento. Para problemas de corrosão aplicar elementos metálicos com baixo teor de oxidação de preferência os metais nobres.

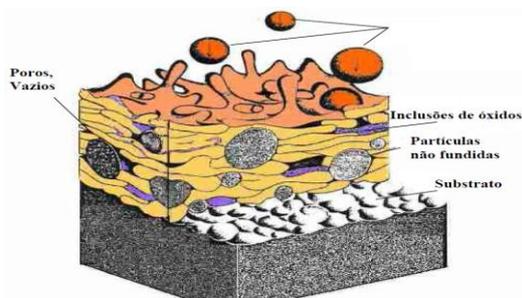
**Tabela 01 – Dados técnicos de metais. Fonte: Soldor tecnologia em soldas.**

TABELA DE METAIS - DADOS TÉCNICOS								
Metais	Símbolo Químico	Ponto de Fusão °C	Peso Específico	Ponto de Ebulição °C	Condutividade Térmica (cal/cm²sec²/°C)	Resistividade (mm²/m)	Dureza Brinell kg/mm²	Resistência à tração kg/mm²
Ferro	Fe	1535	7,8	2740	0,18	0,10	45-60	20
Cobre	Cu	1083	8,9-8,9	2600	0,94	0,017	60-80	16-20
Alumínio	Al	938	2,7	2350	0,53	0,028	25-40	9-18
Magnésio	Mg	650	1,85	1110	0,38	0,044	30-40	15-20
Chumbo	Pb	327	11,4	1740	0,08	0,20	4-7	1,5-2,0
Zinco	Zn	420	8,9	908	0,27	0,059	40-50	20-25
Estanho	Sn	232	7,3	2270	0,18	0,115	10-15	2-4
Cádmio	Cd	321	8,6	765	0,22	0,0068	20-30	5
Níquel	Ni	1452	8,9	2730	0,22	0,068	150-220	40-60
Cromo	Cr	1800	7,1	2500	0,16	0,13	800-1100	-
Tungstênio	W	3400	19,3	5500	0,48	0,05	650-800	>400
Vanádio	V	1720	6,0	3400	-	0,26	-	-
Molibdênio	Mo	2622	10,2	4800	0,35	0,051	150-250	>280
Manganês	Mn	1242	7,3	2150	-	1,85	3-5	50
Cobalto	Co	1495	8,9	2900	0,16	0,092	130-190	50
Tiânio	Ti	1600	4,5	-	-	0,80	-	60-80
Silício	Si	1415	2,3	2300	0,20	0,10	-	-
Prata	Ag	961	10,5	2210	1,0	0,016	25-35	15-20
Ouro	Au	1063	19,3	2970	0,71	0,022	25-30	12-15
Platina	Pt	1773	21,4	4410	0,17	0,10	35-40	10-15

As propriedades e características da camada revestida estão diretamente ligadas à energia cinética e térmica que os processos por aspersão térmica possuem e também a atmosfera que as partículas fundidas ou semi-fundidas se deslocam até a face preparada para o revestimento, formado assim revestimentos mais duros e menos dúcteis. Isso ocorre devido o surgimento de morfologias entre as lamelas tais como inclusão de óxidos, formação de porosidade e partículas não fundidas. A Figura 5 mostra um esquematicamente às morfologias mais típicas na camada (Novicki, 2008).



**Figura 5. Desenho esquemático das morfologias típicas. Fonte: Novicki (2008).**



## **2.4 Preparação da face para o revestimento através do processo de jateamento abrasivo**

A limpeza da superfície a ser aspergida é a etapa mais crítica, pois a adesão do revestimento está diretamente ligada a sua limpeza e rugosidade. Para conseguir êxito é necessário qualidade no material de revestimento e eficácia na preparação da superfície. Primeiramente devem-se retirar contaminantes superficiais, como ferrugem, películas de óxido, umidade, poeira, óleo, graxas, tintas e pinturas. Depois de tal retirada a limpeza deve ser mantida até que o ciclo se complete. As peças devem estar sem a presença de marcas de dedos, tendo de ser manuseada com materiais limpos. O jateamento abrasivo é o mais adequado processo, consiste no choque das partículas abrasivas direcionadas a

superfície a ser aspergida com velocidade elevada. O recomendado é que se utilizem abrasivos a base óxido de alumínio, devendo estes estar secos, pontudos, limpos e cortantes (Alencar, 2009).

Através da rugosidade da superfície a aderência e coesão entre as partículas de revestimento aumentam devido à tensão superficial de contração que é formada, intertravamento de camadas, área de interação expandida e superfície descontaminada. No decorrer da aspersão as partículas fundidas se chocam com o substrato, e quando ocorre o resfriamento estas se contraem, por isso necessitam de uma superfície rugosa que favoreçam o seu ancoramento mecânico. Peças finas não devem ser utilizadas na aspersão com abrasivo, pois podem empenar. O ângulo de inclinação do jato abrasivo a laser deve ser entre  $75^\circ$  e  $90^\circ$  onde o bocal deve estar a uma distância entre 10 cm e 30 cm do substrato. O tempo ideal da operação varia entre três e quatro segundos. Toda superfície que pode ser atingida pelo jateamento a laser deverá ser protegida com cobertura apropriada (Brito, 2010).



Também segundo Brito (2010), as partículas que são projetadas ao substrato sofrem um impacto quando entram em contato com o material, onde estas se ancoram na superfície irregular e resfriam em velocidade elevada. O nível de porosidade é alto, e também chamado de permeabilidade. A Figura 6 mostra um sistema de jateamento abrasivo e uma fotografia de uma peça antes e depois do jateamento.

**Figura 6. Sistema de jateamento abrasivo e peça jateada.**

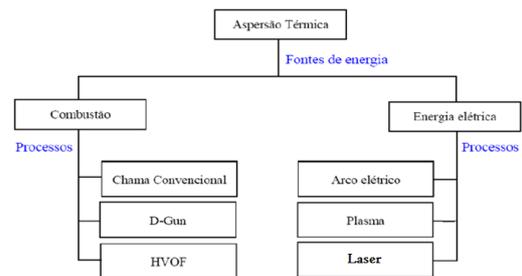


## 2.5 Processos de Aspersão Térmica

Para Novicki (2008), a classificação dos processos de aspersão térmica é dividida em dois grupos, nos quais são diferenciados pelo tipo de energia térmica utilizada para o aquecimento ou fundição das partículas, forma dos materiais a serem utilizados para revestimento e sistema de aceleração das partículas até o contato com substrato. A Figura 7 apresenta os

processos de aspersão térmica e suas respectivas fontes de energia.

**Figura 7. Processos e fontes de energia de aspersão térmica. Fonte: Brito (2010).**



### 2.5.1 Aspersão por Combustão

Os processos por combustão são caracterizados por utilizarem em seu modo de aquecimento e fundição do material de revestimento, a queima de gases combustíveis, sendo mais comum o gás propano, acetileno, hidrogênio, misturados com o oxigênio. De forma que o material não ultrapasse uma temperatura inferior de fusão de aproximadamente 2760°C (Brito, 2010).

Segundo Paredes (2009) são divididos em três tipos de processos, FS -Chama Convencional (*Flame Spraying*), HVOF – Chama com alta velocidade (*High velocity Oxi-Fluel Spraying*) e por fim o processo Dgun – Por Detonação que por sua vez são

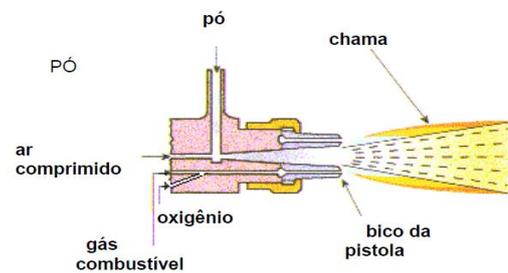


diferenciados pelo modo que os gases combustíveis são queimados dentro da Pistola.

FS - Chama Convencional (*Flame Spraying*) é um processo no qual o material a ser aspergido pode ser utilizado em forma de pó, arame ou vareta, onde é fundido por meio da mistura combustivo/oxigênio que pode gerar uma chama de até 3160°C, situada no bico da pistola. Na utilização do material na forma de pó o mesmo é alimentado para pistola por meio da gravidade ou alimentador remoto até entrar em contato com a chama, em seguida podendo as partículas fundidas serem aceleradas de encontro ao substrato por meio de ar comprimido, (sendo mais utilizados gases inertes como argônio ou nitrogênio), onde aumenta a velocidade das mesmas melhorando adesão das partículas ao substrato. A chama tem duas funções, sendo geradora de energia térmica, com a finalidade de fundir o material de aporte e segunda como geradora de energia cinética, de maneira a contribuir ao deslocamento das partículas de pó fundidas até o substrato atingindo uma velocidade de aproximadamente 30m/s.

A Figura 8 mostra a fotografia de uma pistola alimentada por pó e respectivamente o desenho esquemático do processo.

**Figura 8. Desenho esquemático do processo de aspersão por chama com alimentação por pó. Fonte: Novicki (2008).**

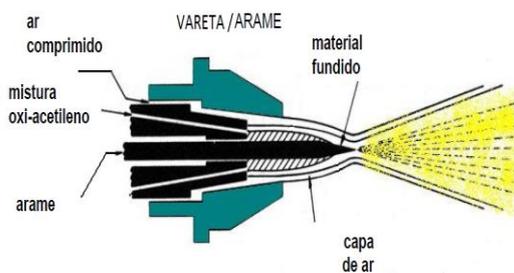


No processo *Flame Spraying* com alimentação em forma de arame ou vareta o material de aporte é conduzido de maneira uniforme até o bico da pistola através de roletes, onde em contato com a tocha e fundido. A movimentação dos roletes pode ser através de turbinas de ar comprimido, motor elétrico, ou sistema pneumático. Brito (2010) cita que os gases utilizados para combustão são unicamente para a fundição do arame ou vareta diferente do processo alimentado a pó, que usa os gases para aceleração do material ao substrato. A aceleração das partículas fundidas é feita através de um sistema de ar comprimido no qual atinge uma velocidade superior ao do processo



alimentado por pó, em torno de 200 m/s, podendo em casos restritos a utilização de gases inertes para minimizar ou até mesmo sanar a oxidação, sabendo que é prejudicial à aderência e formação das lamelas no estrutura do revestimento. Os arame ou varetas possuem um diâmetro entre 3 a 6 mm, sendo normalmente utilizados os materiais com baixo teor de oxidação tais como, molibdênio, alumínio, zinco, bronze, aços inoxidáveis e aços com alta resistência a desgaste. A figura 9 ilustra desenho esquemático do seu processo.

**Figura 9. Desenho esquemático do processo de aspersão por chama com alimentação por vareta ou pó. Fonte: Novicki (2008).**



Comparando o processo *Flame Spraying* alimentado a pó com o abastecido a arame ou vareta podemos observar que o processo a pó atinge uma velocidade de 30 m/s enquanto o alimentado pó arame ou vareta atinge uma velocidade 200 m/s

aproximadamente. Devido a abaixa velocidade no processo a pó, as partículas fundidas se expõem a um maior tempo a atmosfera durante o percurso até o substrato, conseqüentemente aumentando a presença de óxido na camada obtida. Os óxidos geram um elevado número de porosidade e oxidação onde se obtém uma menor adesão das partículas ao metal base (Brito, 2010).

No processo de Chama Convencional (*Flame Spraying*) a posição do jato utilizada pela pistola referente com a face do substrato a ser revestida deve formar um ângulo de 90° para que se possa ter uma melhor conformidade das lamelas, respeitando uma distância entre o bico da pistola e a face preparada de 120 a 250 mm, essa distância é de grande importância considerando que o jato de partículas fundidas que são aspergidas aumenta sua largura de acordo com aumento da distância, podendo elevar a dispersão das partículas, quanto maior a distância maior o tempo que as partículas ficarão expostas a atmosfera e menor a força de impacto das mesmas em contato ao substrato, comumente o nível de



porosidade na camada revestida varia entre 10 a 20% de mesma, e uma aderência de 10 a 20 MPa para metais e ligas e aproximadamente 60 MPa para ligas NiAl (Paredes, 2009).

**Vantagens:** Nesse processo pode-se utilizar três tipos de camadas, com ligas resistentes a oxidação e corrosão, com lidas de carboneto mais usadas para peças com alto índice de abrasão e por fim camadas com ligas cerâmicas onde atua na diminuição de desgastes, abrasão e calor da peça revestida.

**Desvantagens:** Aumento de porosidade e oxidação na camada quando à utilização de ar comprimido para deslocamento das partículas fundidas até o substrato, onde pode ser utilizado um gás inerte para diminuir o número de lamelas com essas morfologias.

**HVOF** – Chama com alta velocidade (*High velocity Oxi-Fluel Spraying*), esse processo foi criado por volta de 1980, objetivando o aumento da energia cinética da tocha através do aumento significativo da vazão e pressão dos gases utilizados na combustão, o jato de elevada velocidade

preparado para aquecer e transportar as partículas de pó aquecidas até o face a ser revestida, atingindo uma velocidade suficiente para adquirir um camada de alta densidade, maior aderência ao substrato, pouca porosidade e baixo teor de óxido, podendo assim ser considerado como um dos mais avançados métodos de aspersão térmica existente no mercado de revestimento por aspersão (Brito, 2010).

Para Parades (2009) o processo HVOF tem como base uma câmara de combustão dentro da pistola, na qual a queima é feita por meio da mistura de oxigênio e um gás combustível, atingindo uma velocidade extremamente alta de exaustão, transportando os gases de combustão por via de um bocal onde atinge uma velocidade supersônica. Segundo Cortes (1998) essa velocidade é alcançada devido a apenas ao aquecimento das partículas na qual não fundem por completo assim aumentando a energia cinética, normalmente atinge uma velocidade aproximada de 1.200 m/s de transferência das partículas aquecidas até o substrato, algumas pistolas mais modernas admitem uma velocidade de



transferência entorno de 3.200 a 5.000 m/s.

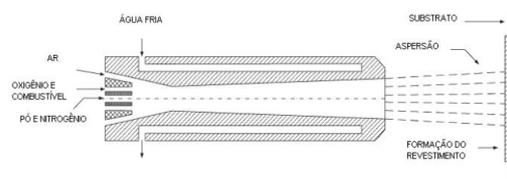
O material de revestimento é em forma de pó, inserido na câmara onde é fundido e conduzido junto com a queima dos gases para fora do bocal, atingindo média temperatura. Para maior tempo de vida útil da pistola é extremamente necessário o resfriamento do bocal e câmara da mesma, normalmente utilizando água como meio de refrigeração. O gás combustível utilizado para combustão pode ser o nitrogênio, acetileno, propileno, propano ou metilacetileno-propadieno, a tocha atinge uma temperatura entre 2.700 a 3.170 °C, isso dependendo da mistura entre oxigênio e o gás combustível utilizado. Devido às altas velocidades imprimidas no fluxo de transferência das partículas ao substrato não é necessário que as partículas de pó estejam totalmente fundidas para que possa atingir uma boa camada de revestimento, no qual diminui a possibilidades de problemas de deformações residuais nas dimensões da peça a ser revestida por consequência de não ocorrer o superaquecimento das partículas (Brito, 2010).

A Figura 10 mostra a fotografia de uma pistola de *High velocity Oxi-Fluel Spraying* e respectivamente a Fig. 11 o desenho esquemático do processo HVOF.

**Figura 10. Pistola de aspersão térmica por High velocity Oxi-Fluel Spraying. Fonte: Castolin (2011).**



**Figura 11. Desenho esquemático do processo High velocity Oxi-Fluel Spraying. Fonte: Brito (2010).**



O processo HVOF já obteve algumas inovações como o desenvolvimento da alimentação a arame, onde se denomina HVCW (*High velocity Combustion Wire*) e também deu origem ao processo HVAF (*High velocity Air Fuel*) que não só utiliza



combustível líquido e oxigênio para gerar a combustão, mas em também no processo de refrigeração da pistola (Paredes, 2009).

No processo *High velocity Oxi-Fuel Spraying* o bico da pistola deve estar posicionado em um ângulo de  $90^\circ$  referente à face preparada para o revestimento, respeitando uma distância de 150 a 300 mm entre o bico da pistola e o substrato, tal distância só é possível devido a alta velocidade que as partículas atingem no deslocamento entre a pistola e a face preparada, sem que as partículas aumentem seu teor de oxido significadamente em contato com atmosfera. Com alta velocidade gerada pelo jato, a porcentagem de poros na camada comparado com outros processos é muito inferior, atingindo uma porcentagem máxima de 1% e uma aderência das lamelas ao substrato superior a 90 MPa (Brito, 2010).

Vantagens: comparados com outros processos o HVOF apresenta um menor porcentagem de poros na camada, maior adesão das lamelas e baixo teor de oxido, devido sua alta velocidade aspersão.

Desvantagem: como os outros processos que utiliza gases combustíveis deve se tomar cuidado com o manuseio dos mesmos.

Dgun – Por Detonação Cortés (1998) e Brito (2010) citam que este processo foi desenvolvido na década de 50 pela hoje chamada Praixar Surface Technologies, e continua sendo o melhor método de aplicação de revestimento por aspersão devido sua alta resistência ao desgaste. A energia é gerada através de explosões dentro de uma câmara decorrente da mistura entre oxigênio e acetileno, onde a mesma é utilizada para fundir e deslocar as partículas de pó até o encontro com o substrato. O material de revestimento é aplicado de maneira discreta, a cada explosão as partículas fundidas reveste a superfície preparada de forma circular de aproximadamente 25 mm de diâmetro e 10  $\mu$ m de espessura.

O interior da pistola é composto por uma câmara que tem comprimento entre 450 a 1.350 mm e raio interno de 10,5 a 12,5 mm, onde a mistura entre oxigênio e gás combustível e detonada, por meio de uma centelha de ignição controlada,



gerando uma alta pressão e elevada temperatura. A velocidade de deslocamento das partículas atingida pela explosão pode chegar aproximadamente até 760 m/s, com uma temperatura no interior da pistola de entre 3.300 a 4.227 °C, sendo um processo repetitivo de detonações onde aquece e desloca as partículas de pó contra a superfície preparada, como uma relação de 15 detonações por segundo, alcançando a espessura da camada desejada através do giro da peça ou deslocamento da mesma em frente à pistola. O manuseio da pistola não deve ser feito manualmente, deve ser conduzido por um sistema automatizado e isolado, devido os impactos e os ruídos de 150 decibéis gerados pelas explosões.

O bico da pistola deve estar a 100 mm de distância do substrato, onde a combinação da temperatura, velocidade, distância e alta força de impacto das partículas na face preparada são responsáveis pelo baixo índice de poros na camada, sendo entorno de 0,5 a 2 % de porosidade, atingindo uma aderência entre a camada e o substrato superior a 70 MPa (Brito, 2010).

**Vantagens:** O processo aplica camadas com baixa porosidade e alta resistência ao desgaste.

**Desvantagens:** a pistola deve ser fixa de devido os impactos gerados pelas explosões, deve adquirir um sistema de movimentação da peça a ser revestida já que a pistola é fixa e um sistema isolamento sonoro da peça e da pistola para proteção dos operadores.

### 2.5.2 Aspersão por Energia Elétrica

Para Brito (2010) os processos por energia elétrica são caracterizados por utilizarem em seu modo de aquecimento e fundição do material a diferença de potencial elétrico. É dividido em três tipos de processos, Arco Elétrico - ASP - (*Arc Spray Process*), Plasma e por fim Laser - PROTAL - (Projeção Térmica Assistida por Laser).

Arco Elétrico - ASP - (*Arc Spray Process*) esse processo também recebe o nome de Arco Arame, é baseado na utilização de ligas metálicas, que através de uma diferença de potencial que varia entre 18 e 40 V se obtém uma fonte de calor. Esta é projetada em um bico de uma pistola, local onde são



colocados dois arames que serão fundidos e depositados na superfície a ser aspergida. Os arcos são atomizados por meio de um jato de ar comprimido em alta velocidade, que direciona o material até a superfície a ser revestida. Após serem carregados com cargas opostas (um lado do arame é anodo e o outro catodo) são alimentados simultaneamente, dando origem a um arco elétrico que aquecerá e fundirá o metal (Paredes, 2009).

Atualmente as pistolas de ar comprimido possuem bico fechado e proteção secundária, o que impede que as partículas de aspersão se aglomerem enquanto são encaminhadas até o substrato a ser fundido. O mecanismo de alimentação do material baseia-se em roletes onde uma pequena turbina movida a ar comprimido ou motor elétrico transfere sua energia cinética para os roletes em movimento circular que por sua vez faz a alimentação do arame até a fundição. As partículas fundidas atingem uma velocidade aproximada de 250 m/s.

Uma fonte de corrente contínua e tensão constante é utilizada no

equipamento, juntamente com alimentadores de arames, tocha de aspersão térmica e sistema de fornecimento de ar comprimido controlado. Geralmente, para esse tipo de processo, são utilizados arames de 5 mm.

Segundo Brito (2010) a corrente contínua é entre 18 e 40 V, isso faz com que a operação possa ser realizada com vários tipos de matérias. Com a elevação da voltagem, o tamanho das partículas e a abertura do arco aumentam. Para se alcançar camadas mais densas e uniformes é necessário que essa voltagem seja conduzida em níveis baixos onde atinge a estabilidade. Aguila (2009) cita que a temperatura do Arco deverá ser maior do que a do ponto de fusão do material a ser aspergido termicamente, normalmente em torno de 4000 a 6000°C. Essa elevada temperatura faz com que surjam zonas de reações químicas ou de difusão no substrato, isso faz com que ocorra maior resistência de adesão e coesão ao revestimento. Castolin (2011) descreve que a energia dessa operação está entre média e alta onde produz tochas com



teor de oxido inferior a ao processo de chama.

A aderência entre o material de aporte e o substrato no processo de arco elétrico atinge um ótimo resultado, alcançando entorno de quatro vezes mais que o processo de Chama convencional. Índice de deposição é alto se comparados aos outros tipos de processos de Aspersão. Isso se dá ao fato da utilização de correntes e tensões contínuas, e dois arames ao invés de um apenas, deixando essa operação com um custo mais baixo em grandes superfícies. Uma boa distância entre o bico da pistola e o substrato para aspersão está entre 50 e 170 mm, podendo atingir uma adesão de 10 a 70 MPa de acordo com o material e ligas utilizadas para revestimento. Comparado com outros processos de aspersão térmica a camada aplicada apresenta maior teor de oxido e porcentagem de porosidade de 10 a 20% (Pawlowski, 2008).

O avanço desse tipo de processo tem ocorrido na alimentação contínua de arame, tendo como ênfase a utilização de um motor elétrico ao invés

de usar unicamente o ar comprimido, melhorando a estabilidade do arco e a extensão da chama.

O material de revestimento por arco elétrico pode ser alumínio, bronze ou aço-inoxidável, níquel, cobre, molibdênio, podendo ser utilizado em carcaça de bombas e cilindro de compressores para restauração dimensional. Quando as partículas forem transportadas pelo ar-comprimido pode ocorrer oxidação destas, prejudicando assim sua aderência, sendo necessária a utilização de um gás inerte (Brito, 2010).

Vantagens: boa aderência da camada, o não uso de gases combustíveis e a ótima coesão entre as lamelas.

Desvantagens: alto valor de oxidação das partículas na utilização de ar comprimido no deslocamento das mesmas até o substrato, assim sendo necessária a utilização de gases inertes para minimizar o teor de oxido.

Plasma - Cita Brito (2010) que o processo de aspersão a plasma foi desenvolvido na década de cinquenta



para o revestimento de peças que serão utilizadas num ambiente que exige o máximo desempenho funcional. Os materiais mais usados são os carbonetos e oxi-cerâmicos, que necessitam de uma alta energia de calor para poder atingir seu estado de fusão, na qual é utilizada um arco-elétrico constringido para se obter alta densidade de energia térmica. Um gás ou a mistura dele é encaminhado até o arco estabelecido entre o catodo de tungstênio e um anodo de cobre resfriado água. Em seu percurso o gás é aquecido em elevadas temperaturas, podendo atingir uma entre 5600, Paredes (2009) relata que já existe pistola típica que atinge 14000 °C, ocasionando assim a ionização, originando o plasma.

A denominação plasma é dada para os gases que atingem um nível superior de energia do seu estado gasoso, onde suas moléculas adquirem um comportamento próprio, ao aumentar sua temperatura as moléculas se dissociam formando átomos independentes, que por sua vez são elevados a altas temperaturas onde gera a ionização do átomo (Motta, 2011).

O Plasma alimenta com o material de aporte em forma de pó, no qual é fundido e acelerado por um jato de alta velocidade, atingido 800 m/s em direção ao substrato. O bocal de constritor tem como função controlar intensidade da corrente elétrica, composição e vazão do gás de plasma, energia, temperatura e velocidade do jato. Normalmente o nitrogênio ou argônio são utilizados como base do gás de plasma, podendo acrescentar hélio ou hidrogênio para aumentar sua velocidade e potência. Nos revestimentos aplicados por plasma a porosidade está entre 1 e 7 %, com uma aderência máxima de 70 MPa , tendo que respeitar uma distância de aspersão entre 60 e 130 mm e um ângulo de 90° (Brito, 2011).

Vantagens: esse processo é tem vantagens similares com o processo a arco – elétrico, porém o que o diferencia o fato de não apresentar um valor significativo de teor de oxido, devido o sistema poder ser instalado numa câmara a vaco. A figura 18 a seguir demonstra o processo de aspersão por plasma.



Laser - também conhecido como aspersão PROTAL (Projeção Térmica Assistida por Laser), é baseado na junção de limpeza, ativação e faixas de camada num único processo, caracterizando-o com aspectos mais econômicos, rápidos e menos prejudiciais ao ambiente de realização (Brito, 2010).

Primeiramente, o substrato é tratado com um jato de Laser de energia elevada. Um feixe com comprimento de 1064  $\mu\text{m}$  e uma duração de jato de 10ms, evaporando a camada de graxa, separando o óxido presente nas camadas e remove a camada atômica superior separando-a, proporcionando a limpeza da face a ser revestida.

Também cita Brito (2010) a diferença dessa operação está no tempo entre a preparação da superfície e a execução da Aspersão Térmica. Dependendo da superfície, ocorre uma redução na aderência o que já implica em resultados de 100m/s, sendo assim a camada de revestimento deve ser aplicada imediatamente após o tratamento a laser. Tal operação deve ser realizada por um robô, já que o laser

óptico é acoplado com uma tocha de jato de plasma.

Suas vantagens consistem em eliminação de limpeza, redução de probabilidade de contaminação da peça, redução do custo e baixo consumo de energia.

## 2.6. Comparação dos Processos de Aspersão Térmica

A Tabela a seguir compara os processos.

**Tabela 02 - Comparação das características de processos de aspersão térmica.**

Processos	Temp. da chama ° C	Velocidade da partícula m/s	Porosidade %
Chama	2200 – 2800	30 – 200	10 – 20
Arco Elétrico	4000 – 6000	250	2 – 10
HVOF	2700 – 3170	1200	> 1
D-gun	3300 – 4227	760	0,5 – 2
Plasma	5600 – 14000	800	1 – 7

## 3. CONCLUSÃO

Com desenvolvimento de novas tecnologias formadas por estrutura metálica o mercado está cada vez mais à procura de materiais que não o surpreendam negativamente. Onde a substituição precoce das peças provoca um elevado prejuízo ao sistema, pois além de ter que comprar uma nova peça, gastar com a execução da manutenção



também prejudica o desempenho na busca de melhores resultados, onde o sistema deixa de ser produtivo no período de manutenção. Assim, para atingir esse objetivo são utilizados processos de Aspersão Térmica, nos quais aplicam uma camada de revestimento na superfície das peças, minimizando desgastes e corrosão das mesmas.

Para realizar a aplicação deve-se conhecer o tipo exposição que a peça a ser revestida sofrerá, podendo escolher o processo mais viável. Os processos são classificados pelo tipo de fonte de energia térmica e diferenciados pela temperatura aplicada e a velocidade de transição das partículas fundidas ou semi-fundidas, pois estão ligadas diretamente as morfologias geradas na camada.

O estudo realizado possibilitou verificar que os processos de melhor desempenho, com menor quantidade de morfologias na camada são o processos que atingem maior energia cinética, transportando as partículas até o substrato numa velocidade elevada, nas quais apresentam menos exposição à atmosfera. São os processos com

melhor desempenho, Plasma, Dgun e HVOF.

#### 4. REFERENCIAS

BRITO, Vinícius Ribeiro dos Santos de Sá. Caracterização de Revestimentos Metálicos Aspergidos Termicamente por Arco Elétrico. Rio de Janeiro, 2010. 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais). CEFET, 2010.

SICA, Yuri Cleverthon. Mapeamento da Corrosividade Atmosférica de São Luis- Ma e a Correlação das Variáveis Ambientais que Influenciam na Degradação Dos Materiais Matálicos. Curitiba, 2006. 145f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materias). Universidade Federal do Paraná, 2006.

DEEBA, Michel. Surface Engineering. *Sine Loco* [S.1.]: ASM Handbook. 1994. 5.ed. 2535p.

NOVICKI, Nilceu. Aplicação da aspersão térmica na soldagem em operação de Tubulações com pequena espessura remanescente. Florianópolis, 2008. 207f. Dissertação (Doutorado em



Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina,2008.

MOTTA, Felipe Piccinini. Aplicação da aspensão térmica na soldagem em operação de Tubulações com pequena espessura remanescente. Porto Alegre,2011. 97f. Dissertação(Mestrado em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Sul,2011.

EUTECTIC CASTOLIN, (2011), Catálogo de Aspensão Térmica Metalização, dissertação, Redação técnica, São Paulo – SP, 11 - 8p.

MERÇON, Fábio. GUIMARÃES, Pedro Ivo Canesso. MAINIER, Fernando Benedito. Corrosão, Eletroquímica, Cotidiano. Química Nova na Escola. São Paulo,v.19,p.1-4,maio.2004.

ALENCAR, Gladston Torres de Mesquita. Efeitos da Adição de carbonetos na resistência aos desgastes e à corrosão de uma liga auto-fluxante depositada por aspensão Térmica. São Carlos,2009. 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade de São Paulo,2009.

THORPE, M.L. Thermal Spray. Advanced Materials & Processes,1993.

AWS-American Welding Society, Inc. Thermay Spraying Practice, Theory and Applications.

MARQUES, P.V. Aspensão Térmica. Infosolda-2003. Acesso no dia 06\09\2013 às 16:45 horas. <http://www.infosolda.com.br/artigos/prosol05.pdf>

PAWLOWSKI, L. The Science and engineering of Thermal Spray Coatings. Second Edition. John Wiley e Sons, Ltd Publishing. England 2008.

PAREDES, Ramón S. Cortés. Aspensão Térmica. Curitiba, 2009. 102f. Universidade Federal do Paraná.2009.

AGUILA, Jaime Villanuev. BUSCHINELLI, Augusto José de a. PAREDES, Ramón Cortes. Caracterização de Consumíveis Antidesgaste e Anticorrosão produzidos especialmente para aspensão térmica por arco-elétric e utilizados para revestir ponteiros de riser para plataformas offshore. Santa Catarina, 2008. 49f. Universidade Federal de Santa Catarina.2008.

