



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
LABORATORIO DE ASPERSÃO TÉRMICA E SOLDAGEM ESPECIAIS



ASPERSÃO TÉRMICA

Professor Ramón S. Cortés Paredes, Dr. Eng.
Curitiba PR
2012

1 INTRODUÇÃO

A aplicação de revestimentos protetores, com finalidades de engenharia, inicialmente era requerida para proteção de conjuntos e componentes mecânicos contra a corrosão. E devido ao avanço de pesquisas no desenvolvimento de novos materiais, atualmente, os revestimentos são utilizados também para elevar a resistência ao desgaste, a corrosão, isolamento térmico e elétrico e contra incompatibilidades químicas e biológicas e recentemente está sendo utilizado aplicando revestimentos para implantes.

O desenvolvimento da tecnologia de aspersão térmica baseia-se na necessidade de se aumentar a vida útil de sistemas e peças, em face o elevado custo de componentes de reposição aliado as vantagens de se recuperar peças as quais se elimina a substituição. E com isto deseja se elevar o desempenho dos sistemas mecânicos em uso. Os quais são cada vez mais solicitados e dentre seus parâmetros de trabalho mais importantes podemos citar a pressão e a temperatura. E para resistir a acréscimos nas solicitações térmicas e mecânicas é exigido da ciência dos materiais o desenvolvimento de ligas específicas para resistir às mais diversas condições de serviço.

Outro fator que promove este desenvolvimento no Brasil vem da exploração do petróleo que tem sua concentração de enxofre elevada fazendo que com isso se tenha um incremento na responsabilidade dos equipamentos para o seu processamento. Em face desta informação a utilização de revestimento estabelece um conjunto de fatores que tem que se completar entre si, como a necessidade tecnológica de que sistemas e peças sejam projetados para operar de forma confiável e satisfatória de forma economicamente viável tanto na sua fabricação quanto na manutenção.

A importância da técnica de revestimento através de “Thermal Spray” – Aspersão Térmica, tem seu avanço mais pronunciado sobre outras formas como CVD (Chemical vapor deposition – deposição química e vapor) e PVD (physical vapor deposition – deposição física de vapor) conforme mostra o BCC Research que compara a evolução nos anos de 2004 e 2009 nos Estados Unidos quanto aos custos relativos à utilização de revestimento, como pode mostra a Figura 1.

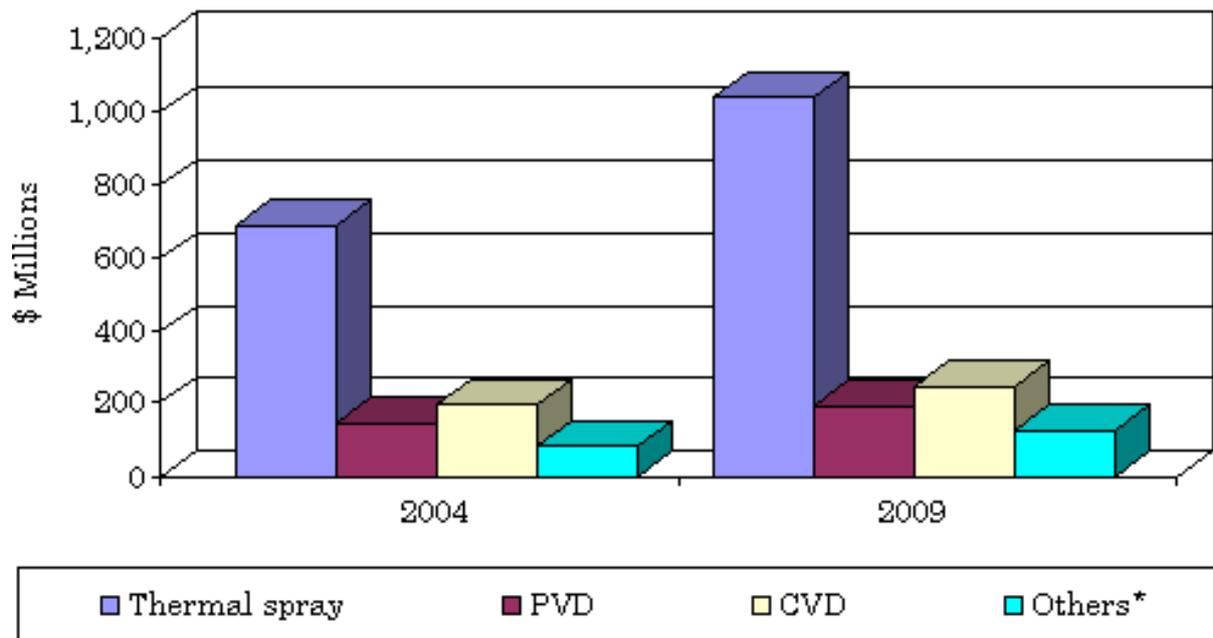


Figura 1 – Avanço financeiro da aspersão térmica nos Estados Unidos. Fonte: <http://www.bccresearch.com/report/AVM015C.html>

De acordo com os processos de aplicação de revestimentos protetores podemos classificar os processos de aplicação em três grandes grupos:

- Aqueles que envolvem fusão do metal e do material de aporte.
- Aqueles que envolvem somente a fusão do material de aporte.
- Aqueles que envolvem um processo de difusão.

É fundamental que sejam analisadas as mudanças superficiais causadas por um ambiente ou por uma condição de trabalho, para determinar a seleção do material para o revestimento e seu processo de aplicação. É importante garantir elevada aderência, baixa porosidade, facilidade de deposição e custo adequado comparado com outras técnicas de proteção de materiais.

Para a aplicação é necessário que se tenha o material de aporte, uma fonte de energia para fundir ou fundir parcialmente as partículas e transferir energia cinética e mais ainda um tipo de bico para direcionar a aplicação, conforme mostra Figura 2.

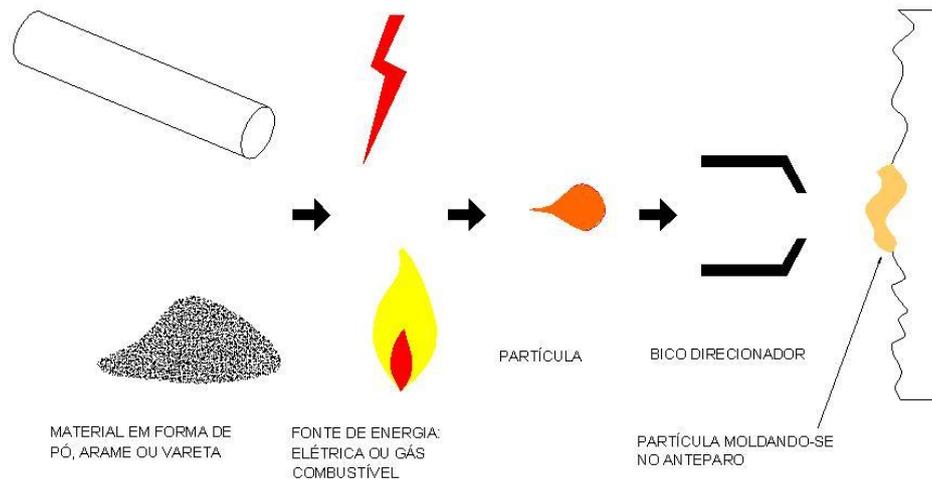


Figura 2 – Esquema de aplicação do processo de aspersão térmica

2 PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA

De forma simplificada a aspersão térmica consiste em um grupo de processos por meio dos quais se deposita, sobre uma superfície previamente preparada, camadas de materiais metálicos ou não metálicos.

E para os processos de aplicação de aspersão térmica, os materiais depositados são levados a um estado fundido ou semi fundido através de uma fonte de calor gerado no bico de uma pistola apropriada. E logo após a fusão, o material na fase de solidificação (na forma de partículas) é acelerado por gases sob pressão contra o substrato que será revestido. A colisão contra a superfície as partículas deformam-se e aderem ao material base e na sequência sobre as partículas já depositadas formando camadas. E estas camadas são constituídas por pequenas partículas deformadas na forma de panquecas em direção paralela ao substrato formando lamelas. (AWS, 1985).

Então de acordo com esta definição qualquer material que não se decomponha quando fundido pode ser utilizado como revestimento.

A classificação dos processos de aspersão térmica distingue-se em dois grupos um que usa a chama e outro que utiliza a energia elétrica como fonte de energia. Conforme mostrado na Figura 3.

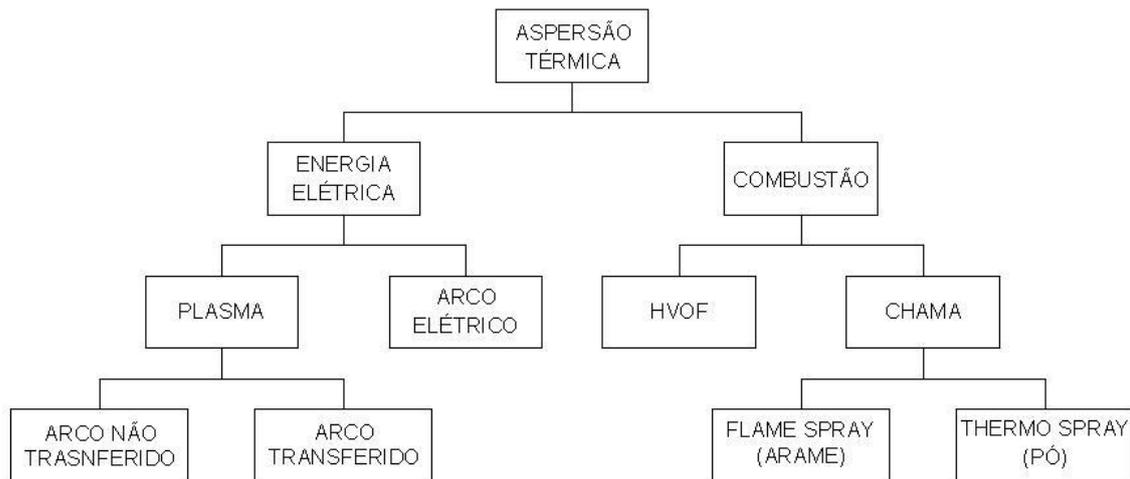


Figura 3 – Classificação dos processos de aspersão térmica. Adicionas Coal Spray – Gás Quente e o processo HVOF – HVCW.

A classificação apresentada na Figura 3, na atualidade, pode ser complementada incluindo os processos “combustion-arc” e “Coald Spray”. O processo combustion-arc o qual segundo (MENEZES, 2007), consiste na introdução de uma pequena câmara de combustão interna à pistola e anterior ao arco elétrico, que gera gases de combustão, com temperatura e pressão elevadas o suficiente para gerar partículas de menos diâmetro e com maior velocidade. Apresentando como resultado níveis de porosidade inferiores a um por cento e também obtém parâmetros de rugosidade superficial inferior quando comparado ao arco elétrico convencional.

Este processo representa uma solução não convencional derivada dos processos a arco elétrico e chama de elevada velocidade. Este processo caracteriza-se por otimizar as melhores propriedades de ambos processos (elevada temperatura do arco e elevada velocidade de propagação da chama), obtendo revestimentos de elevada densidade, tamanho de partículas muito pequenas, elevada tensão de aderência e depósitos de muitas camadas. Na atualidade tem sido preferencialmente utilizado para a deposição de revestimentos oxidos-cerâmicos. Segundo a MetalSpray fabricante destes equipamentos as camadas depositadas por este novo processo proporcionam desempenho superior e de longa vida em meios corrosivos.

Sobre o processo “Coald Spray” no ponto XX será detalhado.

O material do revestimento, o método de aquecimento e o método de aceleração das partículas são variações básicas dos processos de aspersão térmica e segundo a Tabela 1 temos

poder calorífico dos gases combustíveis utilizados e na Figura 4 a velocidade de impacto das partículas conforme seus métodos de aplicação.

Tabela 1 – Temperaturas das fontes de calor adaptado, (ASM, 1994).

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

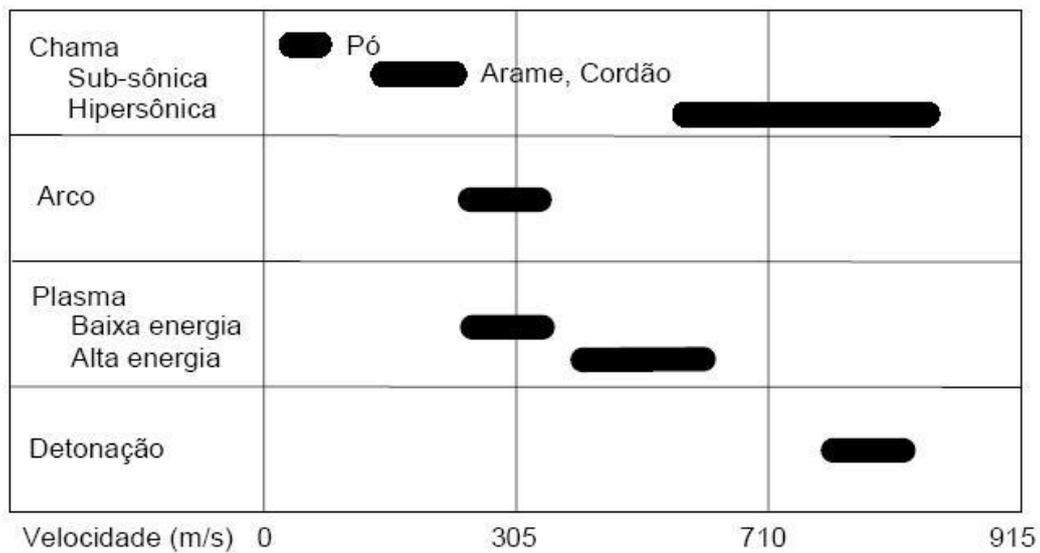


Figura 4 – Velocidade média de impacto das partículas conforme os processos (MARQUES, 2003).

E evolutivamente conforme a Figura 5 mostra o desenvolvimento crescente da indústria de aspersão térmica, e a partir do ano de 1970 o aumento nas vendas relativo aos processos de AT oxí-combustível de alta velocidade e plasma de alta energia.

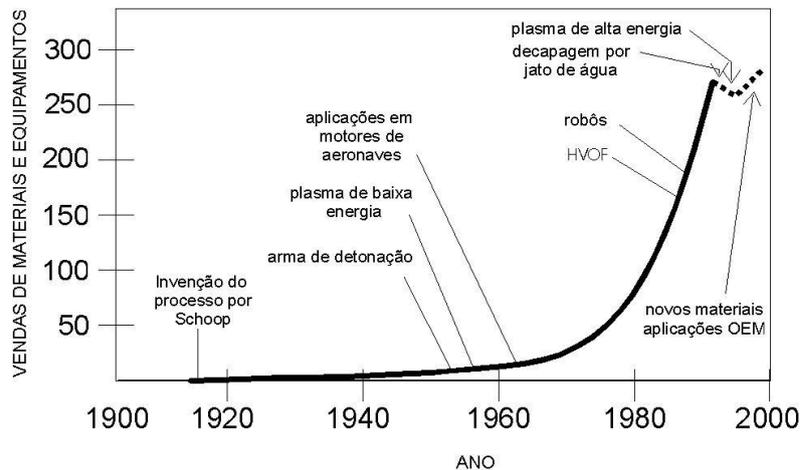


Figura 5 – História e crescimento da indústria de AT (THORPE, 1998).

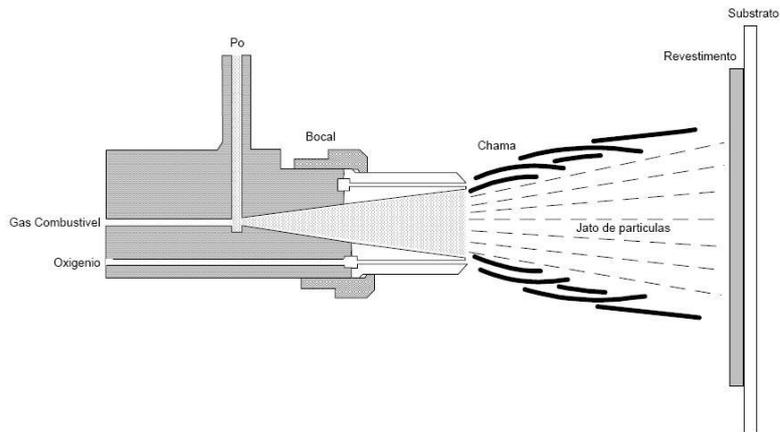
2.1 ASPERSÃO TÉRMICA A CHAMA CONVENCIONAL – FS

Este processo, FS (*Flame Spray* – Aspersão por chama), também conhecido como processo a chama oxiacetilênica, que utiliza a energia gerada pela combustão de um gás combustível misturado com oxigênio para fundir o material de deposição que pode ser na forma de pó ou arame (sólido ou tubular). E os materiais podem ser metais, ligas metálicas, materiais cerâmicos e até alguns plásticos.

2.1.1 Aspersão Térmica a Chama Utilizando Pó

E para o processo de FS utilizando o material de aporte na forma de pó tem-se a alimentação de gás de forma axial e a alimentação do pó para a pistola é geralmente por gravidade, na qual as partículas têm a mínima velocidade no momento do encontro com a chama. E neste instante ocorre a fusão e um jato de ar comprimido as projeta contra o substrato. Um esquema deste bocal é mostrado na Figura 6.

E utilizado FS com pó o revestimento tem menor resistência adesiva e resistência coesiva e maior porosidade em geral e isto devido a menores velocidades alcançadas pelas partículas. Logo as aplicações recomendadas são quando utilizadas com materiais chamados autofluxantes, principalmente as ligas a base de níquel. Então após serem depositados materiais com estas ligas com auxílio de maçaricos ou fornos o revestimento é aquecido até sua fusão e atingir sua densificação e aderência desejada. Mas a camada deste revestimento é limitada até as faixas de temperatura de fusão sem que haja a descamação.



a



b1

b2

Figura 6 – a) Esquema da seção transversal de uma tocha de aspersão por FS utilizando pó (MARQUES, 2003); b1) Pistola a chama por gravidade e b2) Pistola chama tipo 6P (LABATS).

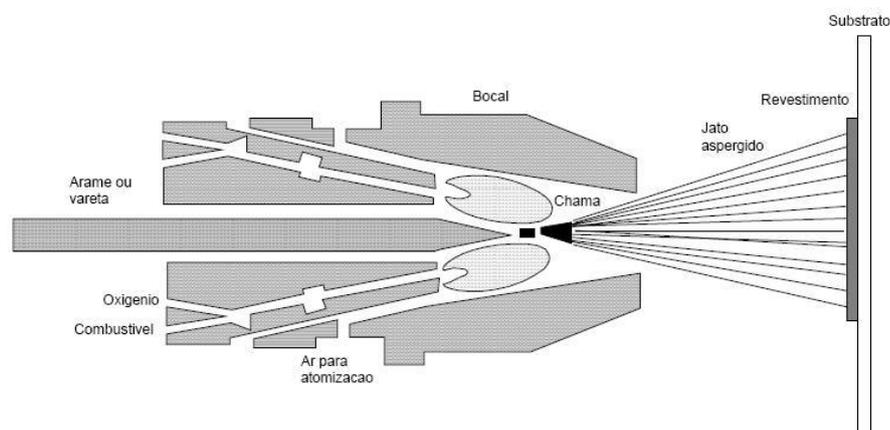
O pó de alimentação pode ser um metal puro, uma liga, um compósito, uma cerâmica, um carboneto ou qualquer combinação destes, com uma taxa de alimentação que pode variar de 50 a 100 g/min e com taxa de fluxo de gás de transporte entre 3 a 5 l/min.

2.1.2 Aspersão Térmica a Chama Utilizando Arame

Para aplicação com o material na forma de vareta ou arame o equipamento deve possuir um sistema de alimentação que pode ser através de roletes que são tracionados por motor elétrico, motor pneumático ou por uma turbina de ar. E o material é alimentado até a tocha que para utilização de arame tem a seguinte configuração conforma a Figura 7.

O arame alimentado, de forma contínua e concêntrica, é fundido no bocal por uma chama de gás combustível que só tem esta finalidade. E para aspergir o material é utilizado ar comprimido e devido à configuração do bocal, o fluxo de ar lançado sobre as partículas fundidas faz com que haja a pulverização com maior velocidade (energia cinética) até o substrato. Esta energia é aumentada pelo ar comprimido de duas maneiras:

- Distribuição de gases combustíveis ao redor do arame para uma fusão uniforme e,
- Assegurar o tempo suficiente de permanência do arame na chama para uma fusão eficiente, mesmo utilizando-se velocidades do ar comprimido elevadas.



a



b

Figura 7 – a) Esquema da seção transversal de uma tocha de aspersão por FS utilizando arame (MARQUES, 2003). b) Modelo de pistola a cama arame tipo E14 (LABATS)

E segundo (PAWLOWSKI, 2008) o diâmetro dos arames varia de 3 a 6mm, mas os mais comuns são 3, 3,17 e 4,75mm, e a taxa de alimentação do arame podem variar de 40 a 650g/min. Para os materiais mais comumente usados na forma de vareta são cerâmicos e para esta aplicação as tochas são projetadas com algumas variações no bocal de gás, tampa de ar e sistema de alimentação. E devido a temperaturas e fusão das cerâmicas ser mais elevados é necessário mais cuidado com o manejo e no ajuste de suas variáveis. E também tem diâmetros variando entre 3 e 6mm.

E quando é utilizado o material de aporte na forma de arame as partículas fundidas são maiores o que lhes confere uma maior velocidade.

E tanto para a utilização de pó ou arame os equipamentos necessários para FS estão mostrados na Figura 8.

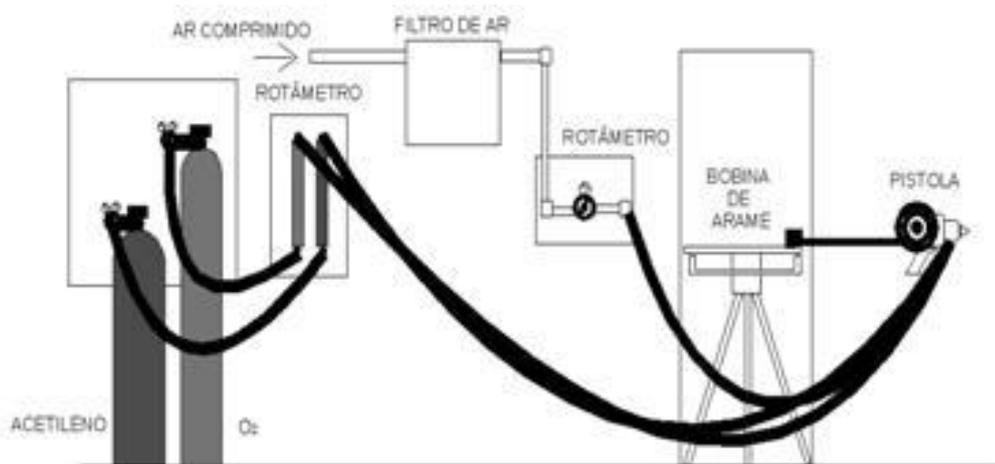


Figura 8 – Esquemas das instalações do processo a chama arame.

Neste processo as partículas oxidam, pelo oxigênio contido no ar, prejudicando isso a aderência. Pode-se, também, utilizar para o transporte das partículas gás inerte em lugar de ar comprimido para minimizar a oxidação.

As principais variáveis que devem ser regulados no processo FS são:

- Pressão e fluxo de ar comprimido que serve para transferir as partículas da fonte de calor até o substrato e para fornecer à turbina a pressão suficiente para alimentar com arame o bico da pistola

- Fluxo de gás combustível e oxigênio para formar e manter uma chama (neutra) que permite a fusão do material.

O processo FS tem como características principais (PAWLOWSKI, 2008):

- Distancia de aplicação, entre o substrato e a tocha varia entre 120 a 250mm.
- Ângulo da pistola tendo como melhor resultado 90°.
- A atmosfera de aplicação é o ar.
- A temperatura do substrato deve ser mantida na faixa de 100 a 200 °C quando aspergido cerâmica em metais com a finalidade de se evitar tensões residuais.
- Quando utilizado materiais autofluxantes ao serem aquecidos podem chegar até uma temperatura de 727 °C limitando com isto os materiais para o substrato.

Propriedades do revestimento através do processo FS (PAWLOWSKI, 2008):

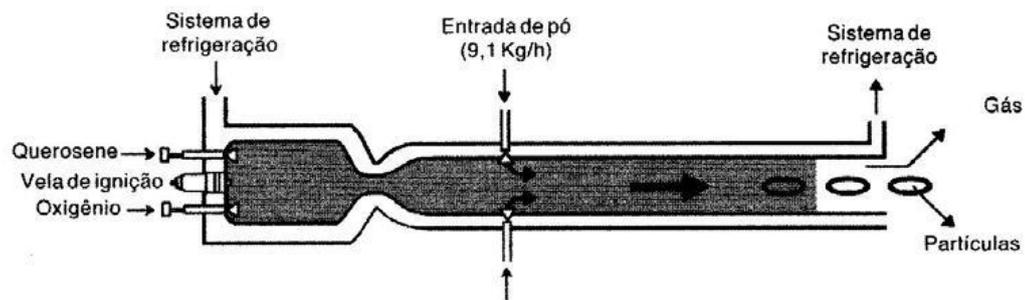
- Os revestimentos aspergidos com liga de Ni-Al podem alcançar resistência adesiva na ordem de 60MPa ou até mesmo 70MPa para ligas autofluxantes.
- Para revestimentos cerâmicos os valores típicos são na ordem de 15MPa e 30 para metais e ligas.
- A porosidade esta no intervalo de 10 a 20%, podendo ser praticamente zero depois do tratamento para materiais autofluxantes.
- As espessuras variam na faixa de 100 a 2500 μm (0.1 a 2.5mm).

2.2 ASPERSÃO TÉRMICA A CHAMA DE ALTA VELOCIDADE – HVOF

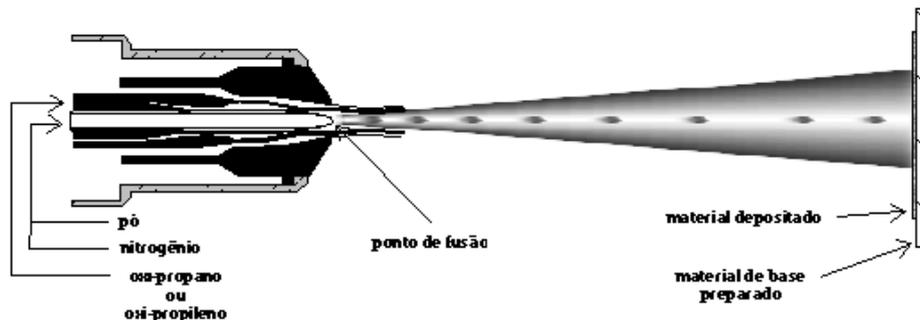
O processo de AT a chama de alta velocidade mais conhecido como HVOF, (*High Velocity Oxi-Fuel*), um combustível gasoso ou líquido, podendo ser propileno, hidrogênio, propano ou querosene, é misturado com oxigênio. E é a razão de vazão de oxigênio/gás combustível que determina a temperatura que atinge a chama como, por exemplo, a mistura oxigênio - acetileno (1,5:1 em volume) alcança 3170°C e oxigênio - propileno (4:1 em volume)

alcança 2900°C. E diante destas temperaturas o bocal e a câmara de combustão têm que ser arrefecidos de forma constante, em geral com água.

A queima acontece à alta pressão em uma câmara de combustão gerando um jato de exaustão de alta velocidade. E após a combustão gases são liberados e se expandem através do bocal para fora da pistola a velocidades supersônicas. A Figura 9 mostra esquematicamente uma tocha de HVOF.



a



b

Figura 9 – a) Esquema de uma tocha de AT supersônico HVOF tipo convergente divergente. b) Esquema do tipo de pistola com câmara venturi.

No modelo da Figura 9a, a alimentação do pó é realizada imediatamente após a expansão dos gases em entram em combustão na câmara e saem com elevada energia cinética e térmica e transportam as partículas até o substrato a ser revestido.

No modelo da Figura 9b, alimentação do pó no bocal é realizada de forma concêntrica ao bico da pistola. Utilizando gás nitrogênio para transferir o pó, inclusive no trajeto até o bico. O pó é atomizado ao passar por uma câmara quente tipo Venturi que além de aquecido tem a velocidade aumentada. Mas o pó não funde devido ao curto intervalo de tempo que estas

partículas ficam na fonte de calor, as quais são apenas aquecidas, o que permite a elas um significativo aumento de sua energia cinética. E assim no momento do impacto contra o substrato as partículas transferem elevada energia (cinética + impacto + elevado calor) conforme (CORTÉS, 1998).

Também segundo (CORTÉS, 1998) a velocidade de projeção das partículas pelo jato de transferência (fluxo de nitrogênio + propagação da chama) podem alcançar até 1200 m/s, sendo conhecido este processo como supersônico. E na atualidade, pistolas modernas permitem gerar velocidades de gases de transferência de partículas entre 3200 a 5000 m/s. E neste tipo de pistola, o gás combustível e o oxigênio se misturam e são atomizados antes de passar através de orifícios para a câmara de combustão, por conseguinte criando uma combustão estável, limpa e uniforme. E para garantir a pressão constante e a combustão apropriada à câmara de combustão é monitorada. A versão desta pistola é mostrada na Figura 10.

O sistema de saída, convergente/divergente, da câmara de combustão é dimensionado para criar um jato supersônico que mantém a área de baixa pressão onde o pó é radialmente injetado através de múltiplos injetores. A pistola JP-5000 usa a injeção radial de pó no canhão e este sistema traz os seguintes benefícios:

- Menor pressão de injeção do pó é necessária, uma vez que o pó é injetado em uma área de baixa pressão criada pelo sistema convergente/divergente da saída da câmara de combustão.
- A velocidade e a temperatura do pó estão melhores distribuídas através do spray.

Uma vez injetado, o pó se mistura com o gás e é acelerado até próximo da máxima velocidade, no ponto em que deixa o canhão, e carregado à frente com velocidade constante até seu impacto com o substrato. A saída convergente/divergente no interior da câmara de combustão é projetada para conduzir uma configuração de fluxo que auxilia na distribuição do pó e produz um perfil quase único de velocidade de partícula quando de sua saída do canhão. Isso resulta em um revestimento mais consistente.

Um depósito consistente de revestimento significa que menos pó será necessário para se alcançar a espessura desejada, e menos trabalho de usinagem será requerido para se obter o acabamento necessário.

Devido à temperatura da chama ser relativamente baixa, torna-se difícil a AT de cerâmicas e alguns metais refratários. E as altas velocidades que as partículas imprimem no momento do impacto sobre o substrato implicam que as partículas podem não necessariamente estar totalmente fundidas para gerar um revestimento de alta qualidade. Isto propicia minimizar problemas de tensões residuais no substrato de revestimentos espessos e em diâmetros internos por não haver superaquecimento das partículas conforme (LIMA E TREVISAN, 2002).



Figura 10 – Pistola do processo de AT por HVOF modelo JP – 5000 TAFSA.

Os equipamentos utilizados para este processo de AT de HVOF podem ser vistos na Figura 11.

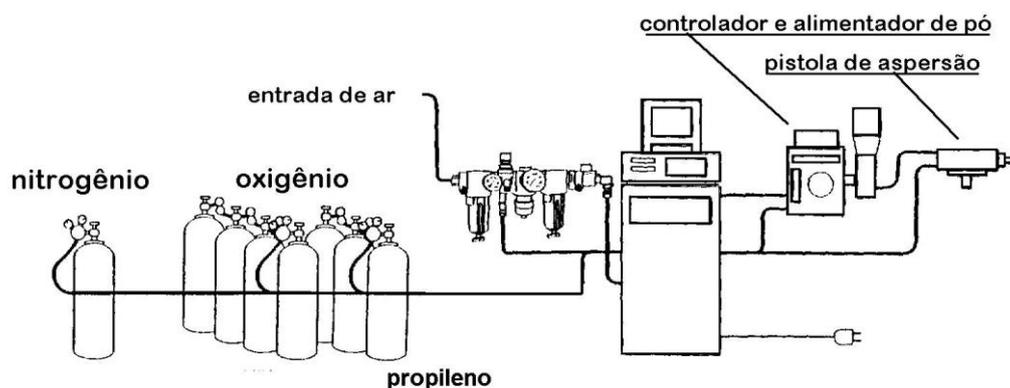


Figura 11 – Esquema de instalações do processo a chama de elevada velocidade - HVOF (HOWARD).

O processo HVOF tem como características principais (PAWLOWSKI, 2008):

- Devido à elevada convectividade a distância de aplicação esta no intervalo de 150 a 300 mm.
- O tamanho das partículas está na faixa de 5 a 45 μm .
- A alimentação de pó é na faixa de 20 a 120 g/min.
- Os alimentadores de pó são geralmente do tipo placa rotativa.

Outras características do processo HVOF segundo (LIMA E TREVISAN, 2002).

- As taxas do fluxo de gás combustível estão entre 40 a 60 l/min.
- O fluxo de oxigênio pode ser de até 430 l/min.
- O nível de ruído deste processo excede a 140 decibéis.

Propriedades do revestimento através do processo HVOF (PAWLOWSKI, 2008):

- Aderência da camada superior a 90MPa.
- Porosidade inferior a 1%.
- Espessura de material depositado na faixa de 100 a 300 μm (0.1 a 0.3 mm).

Diversas inovações têm sido implementadas no processo HVOF:

- A tecnologia de Ultra-revestimento aplicada para proteção contra corrosão, desenvolvida pela empresa norte-americana Amoco, utiliza hidrogênio como gás combustível o que confere uma proteção de gás inerte para a chama. Conseguem-se com esta técnica menos porosidade entre as lamelas e menor conteúdo de óxidos.
- Outro avanço que foi baseado no processo HVOF é o sistema chamado HVAF (*High Velocity Air Fuel* – ar combustível de alta velocidade), sistema no qual o ar, ao invés de oxigênio, sustenta a combustão, em conjunto com um combustível líquido. E o fluxo de ar também é utilizado para resfriar a tocha, em vez de água. O material, em forma de pó,

é injetado em uma região da tocha com fluxo de gás a baixa pressão. E o resultado é a manutenção da qualidade do revestimento com relevante redução de custo. E este equipamento é compacto e pode ser separado em módulos para uso em campo.

- E outra inovação do processo HVOF é o chamado HVIF (*Hipersonic Velocity Impact Forging* – Forjamento por impacto hipersônico). Neste processo a temperatura dos gases de combustão expandidos é mantida baixa o suficiente para evitar a fusão de qualquer das menores partículas de pó alimentado. A conversão da energia cinética para calor no impacto permite a fusão do revestimento apenas neste momento, resultando baixa porosidade e mínima quantidade de óxidos contidos no revestimento.
- E também existem equipamentos HVOF projetados para uso no campo, com módulos portáteis para o sistema de resfriamento e alimentação de gases.

Segundo (SCHIEFLER, et al, 2003) o recente desenvolvimento do processo HVCW (*High Velocity Combustion Wire*) que utiliza a alimentação do material do revestimento na forma de arame, impõe uma maior velocidade das partículas, resultando numa microestrutura mais refinada proporcionando melhores propriedades do revestimento quando se comparado com outras técnicas de aspersão, como por exemplo, chama convencional e arco elétrico. A Figura 12 mostra o esquema de uma pistola HVCW com alimentação de arame.

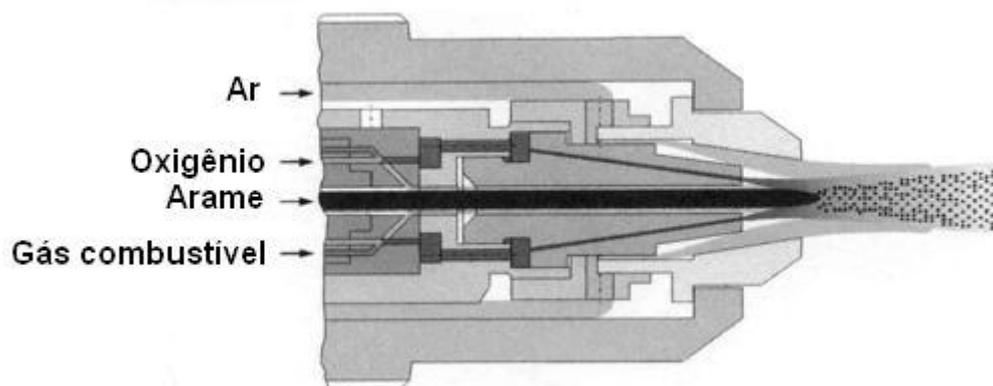


Figura 12 – Esquema de uma tocha de HVCW, modificado de (SCHIEFLER et al, 2003).

2.3 ASPERSÃO TÉRMICA POR DETONAÇÃO – D-GUN

Este processo utiliza a energia proveniente da explosão de uma mistura de oxigênio – acetileno para aquecer e dar a propulsão necessária para o material, sempre, em pó para

encontrar a superfície do substrato. A tocha consiste em uma câmara de reação com comprimento de entre 450 a 1350 mm e diâmetro interno entre 21 a 25 mm e opera com resfriamento a água. A tocha de detonação é diferente como pode ser vista na Figura 13.

Para a detonação são introduzidos uma mistura de oxigênio e gás combustível, em geral acetileno e material para revestimento em pó. Então realizada a ignição da mistura de gases, através de uma centelha elétrica, que faz gerar uma onda de detonação controlada, de alta pressão e temperatura. E isto confere as partículas de pó aquecimento e aceleração enquanto são expulsas do cano da tocha para a superfície do substrato resultando em um depósito extremamente duro, denso bem aderente.

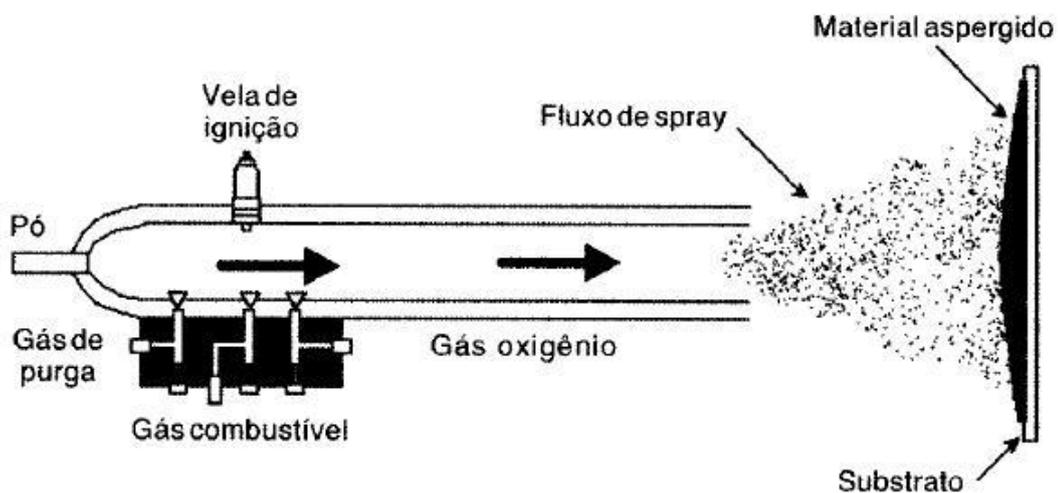


Figura 13 – Esquema de uma tocha de AT por detonação (LIMA E TREVISAN, 2002).

A velocidade de saída das partículas do cano pode atingir até 760 m/s e este é um processo cíclico e após cada injeção de material de aporte ter sido disparada, imediatamente um pequeno pulso de nitrogênio purga o cano e a câmara da tocha.

E com uma taxa de 15 detonações por segundo é permitido que a deposição do revestimento seja realizada até a espessura desejada, enquanto a peça gira ou passa pela frente da pistola. E a aplicação não forma um leque contínuo de revestimento saindo da pistola, como em outros processos de AT, a cada detonação se tem um círculo de diâmetro de 25 mm e com poucos micrômetros de espessura. E a espessura de revestimento é formada por uma sobreposição precisa destes círculos.

A temperatura máxima alcançada pela mistura com 45% de acetileno chega a 4227°C. Mas a temperatura mais comum encontrada para este processo esta na ordem de 3300°C a qual é atingida pela pistola de detonação enquanto a temperatura do substrato é mantida abaixo de 150°C através de um sistema de refrigeração que utiliza dióxido de carbono.

Este processo de aspersão é classificado em separado, muito embora pudesse estar colocado junto aos processos de aspersão à chama, visto que ele também emprega a combustão de mistura de gases, porém de forma explosiva, (MENEZES, 2007).

As operações com o equipamento de AT por detonação têm que ser totalmente automatizado e controlado a distancia devido ao nível de ruído gerado por este processo.

E praticamente todo material metálico, cerâmico ou metal – cerâmico pode ser depositado por este processo e como exemplo os materiais mais aplicados neste processo são: Alumina, Alumina – Titânia, Carboneto de Cromo, Carboneto de Tungstênio e ligas conforme (LIMA E TREVISAN, 2002).

A alta velocidade imprimida às partículas produz elevada energia cinética que se libera no momento em que impacta com o substrato, resultando em excelente grau de adesão da camada ao material base. Na continuação do processo, esta mesma energia é responsável por excelente coesão entre as partículas determinando camada com baixo índice de porosidade, o que permite grau de acabamento muito bom durante os trabalhos posteriores de retificação.

O processo de AT por detonação tem como características principais (PAWLOWSKI, 2008):

- À distância de aspersão de 100 mm.
- O tamanho das partículas de pó necessário está entre 5 a 60 μm (0.005 a 0.06 mm).
- Taxa de alimentação de pó na faixa de 16 a 40 g/min.
- Diâmetro do ponto aspergido de 25 mm.
- Frequência dos ciclos de 1 a 15 Hz.
- Nível de ruído acima de 150 decibéis.

Propriedades do revestimento através do processo de detonação (PAWLOWSKI, 2008):

- Aderência da camada é superior a 83 MPa com WC-Co e superior a 70 MPa com Al_2O_3 .
- Porosidade de 0,5 % para WC-Co e 2 % para Al_2O_3 .
- Espessuras típicas depositadas de até 300 μm (0,3 mm).

2.4 ASPERSÃO TÉRMICA POR PLASMA SPRAY - PS

O desenvolvimento da indústria aeroespacial abriu um campo extraordinário para a utilização dos revestimentos aplicados por processos de AT, pois o desenvolvimento de seus componentes expostos a condições cada vez mais severas tem exigido bom desempenho de materiais de engenharia. Então a grande maioria dos materiais que se prestam a estas aplicações são os oxi-cerâmicos e carbetos que exigem temperaturas para sua fusão e sobreaquecimento muito acima daquelas obtidas na chama de gás ou arco elétrico.

Por isto desenvolveu-se o “Plasma” que veio atender estas novas exigências. Ao mesmo tempo, ele criou uma nova família de materiais e técnicas de deposição para enorme gama de aplicações industriais. Neste processo utilizam-se materiais consumíveis exclusivamente sob a forma de pó.

Desta forma para um melhor esclarecimento do processo de deposição por plasma, convém uma breve explicação da base teórica.

Plasma é o nome dado a gases elevados a um nível energético superior ao estado gasoso normal. Gases comuns consistem de moléculas que, quando aquecidas, seguem as leis da física e termodinâmica clássicas, enquanto o plasma se comporta de acordo com leis próprias, o que lhe valeu o título de quarto estado da matéria.

A elevação do nível energético de gases di ou multi-atômicos para plasma, processa-se em dois estágios. Com alimentação de energia, tem-se inicialmente a dissociação da molécula para átomos independentes. Continuando a alimentação de energia, temos uma elevação do nível energético proporcional ao aumento da temperatura até chegarmos ao nível onde a energia alimentada causa a ionização do átomo.

Isto significa que um ou mais elétrons são separados do átomo, passando, conseqüentemente, o gás ao ser condutor de eletricidade, tendo o elétron carga negativa, o resto do átomo, carga positiva.

Submetendo-se um gás nobre ou mono atômico ao mesmo processo, a seqüência é idêntica, com exceção da dissociação da molécula. A energia necessária para a dissociação e ionização do gás é liberada novamente quando ele se esfria e esta energia é utilizada para o aquecimento e fusão dos materiais a serem depositados. Na Figura 14 pode-se ver a energia liberada por alguns desses gases.

Existem dois modos de formação de plasma arco transferido e o não transferido: No primeiro caso, o arco atinge a peça de trabalho que fecha o circuito elétrico. No segundo caso, o arco é estabelecido e mantido entre o eletrodo e o orifício constrito. Desta forma o plasma é forçado através do orifício pelo gás e a peça não faz parte do circuito elétrico. O calor útil é obtido somente do jato de plasma, sendo conhecido como processo de AT plasma spray. A Figura 15 mostra esquematicamente a formação do plasma. O termo "arco plasma" é utilizado para descrever uma família de processos de trabalho em metais que usam um arco elétrico constringido para fornecer energia térmica de alta densidade.

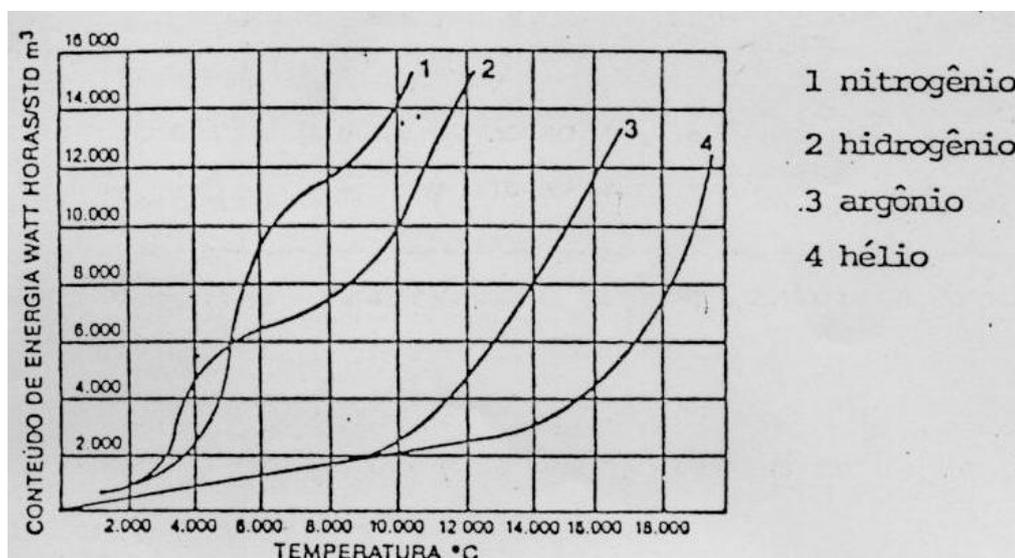


Figura 14 – Energia liberada na dissociação de gases inertes (ABS, 1994).

A Figura 15 mostra o sistema de aspersão térmica a plasma e a diferença deste equipamento entre os processos plasma arco transferido e arco não transferido esta na tocha, e a Figura 16 esquemas das instalações do sistema plasma spray.

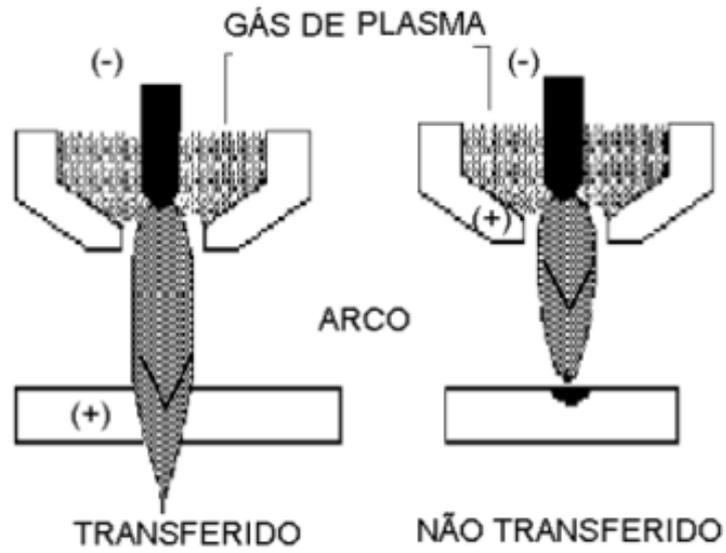


Figura 15. Esquema da pistola e da formação do plasma.

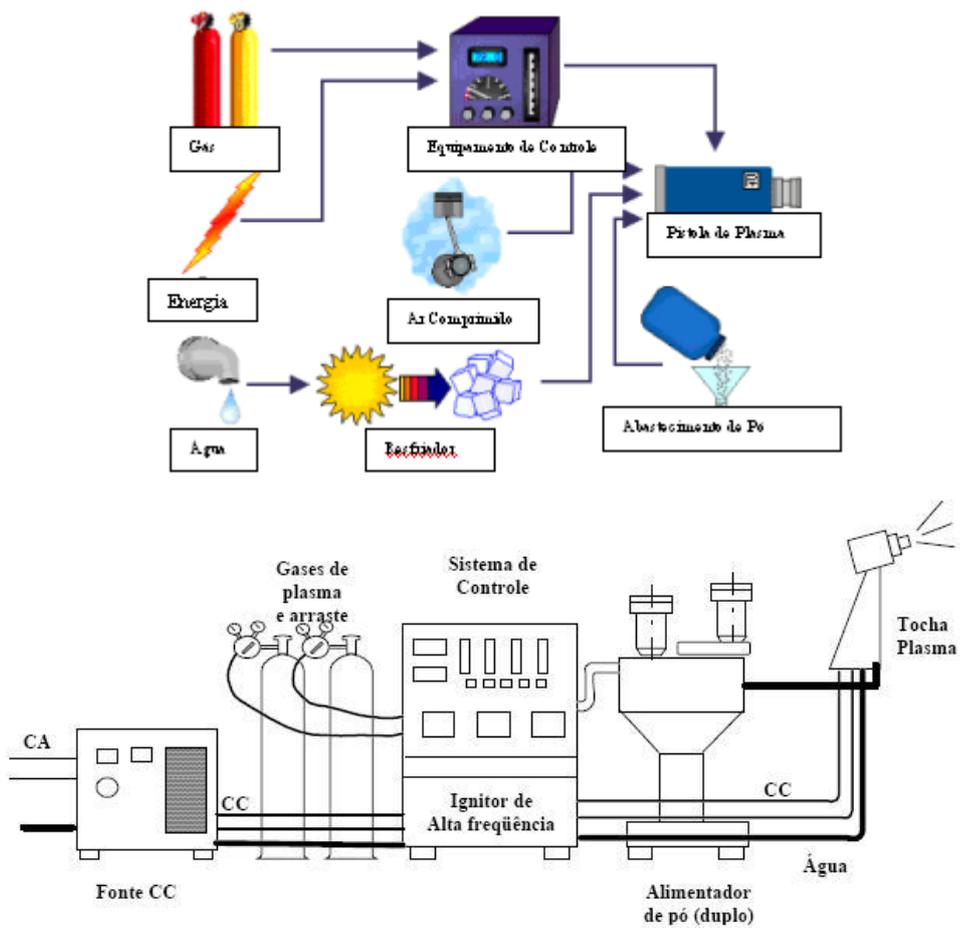


Figura 16 – Esquema de uma instalação para AT a plasma.

2.4.1 Processo de AT por Plasma de Arco Transferido – PTA

O processo PTA (*Plasma Transferred Arc* – plasma de arco transferido), adiciona ao processo de aspersão a plasma a capacidade de aquecimento e fusão superficial do substrato. Desta forma pode-se dizer que é uma combinação de processos de soldagem e aspersão térmica. Nesta técnica, uma corrente secundária é estabelecida entre o eletrodo da pistola e o substrato que é condutor. A fusão superficial e a profundidade de penetração são controladas pela corrente do arco secundário. O material aspergido, geralmente na forma de pó, mistura-se com material da poça de fusão formada no substrato ocorrendo então uma diluição.

A ligação do revestimento ao substrato é metalúrgica, ocorrendo uma diluição na faixa de 10% o que pode tornar um limitante deste processo, pois o aquecimento e a fusão superficial inevitavelmente provocam alterações de microestrutura. Outra limitação é que o material do substrato tem que ser um material condutor e que possa suportar alguma deformação.

Esta técnica produz um revestimento que possui alta densidade e alta taxa de deposição com grandes espessuras por passe e comparativamente para mesma quantidade de material depositado o processo PTA utiliza 5% da energia necessária pelo processo de arco não transferido.

Este processo é bastante usado em endurecimento superficial de assentos de válvulas, equipamentos agrícolas e de mineração, em geral utilizando sistemas mecanizados e automatizados que reproduzem boa repetibilidade.

A Figura 17 é uma representação esquemática do processo de aspersão a plasma de arco transferido.

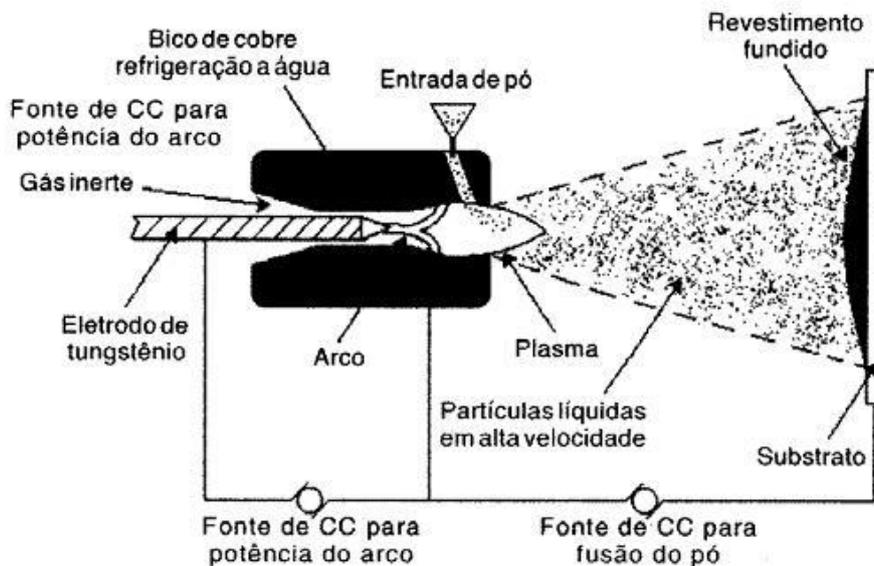


Figura 17 – Esquema de aspersão pelo processo PTA (LIMA E TREVISAN, 2002).

Características do processo PTA segundo (LIMA E TREVISAN, 2002).

- Espessuras de revestimento de 0,5 a 6 mm.
- Largura de revestimento de 32 mm em passe único.
- Alimentação de pó na ordem de 9 kg/h.

2.4.2 Processo de AT a Plasma de Arco Não Transferido – APS

O processo de AT por plasma de arco não transferido APS (*Air Plasma Spraying*) em que o material para revestimento é aplicado a partir do pó e utiliza o calor de um arco plasma para provocar a fusão.

A zona central do plasma é constituída pelo gás inerte ionizado, em geral argônio, podendo ser nitrogênio, também adições de hidrogênio e hélio podem aumentar a potencia e velocidade do plasma. E estes gases passam através de um arco elétrico estabelecido entre um cátodo de tungstênio e um ânodo de cobre dotado de um orifício, alinhados coaxialmente. Em sua passagem o gás é aquecido, gerando o plasma. E isto é envolvido por um ou mais gases inertes de proteção (argônio, hélio, hidrogênio, nitrogênio ou mistura).

E quando o plasma sai da pistola, moléculas dissociadas de um gás diatômico recombinam e liberam calor. O pó é alimentado no plasma, fundido e acelerado em direção ao substrato em um fluxo de alta velocidade. A energia, temperatura e velocidade do jato de plasma são controladas pelo tipo de bocal constritor, intensidade da corrente elétrica, composição da mistura de gases e taxa de fluxo de gás de plasma.

A constrição do arco é provocada forçando o arco plasma através de um orifício em um anodo de cobre arrefecido com água tendo como propósito esta constrição o controle e aumento da densidade de energia do fluxo do arco. Em uma pistola típica o plasma pode alcançar a temperatura de 14000°C e uma velocidade de 800 m/s .

Na Figura 18 é mostrado esquematicamente o processo de AT a plasma por arco não transferido.

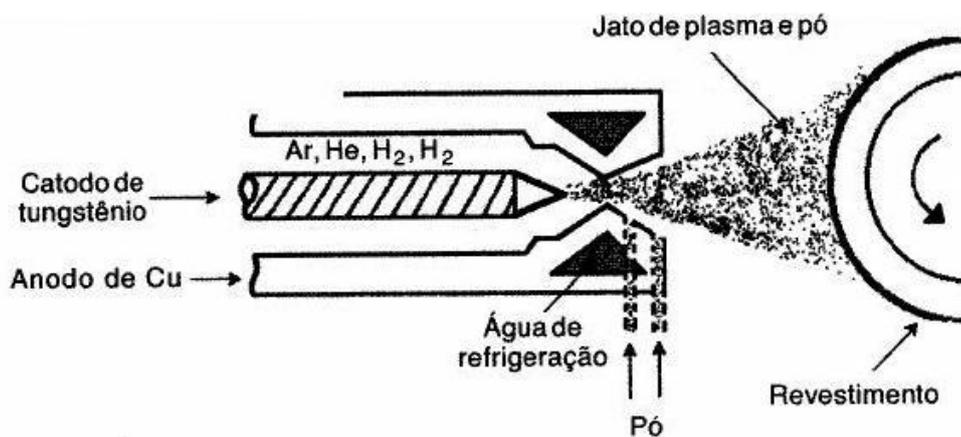


Figura 18 – Esquema de aspersão pelo processo APS (LIMA E TREVISAN, 2002).

E na Figura 19 um corte transversal de uma tocha real em que: (1) ânodo, (2) cátodo, (3) sistema de resfriamento do cátodo, (4) sistema de resfriamento do ânodo, (5) entrada de gases de trabalho, (6) alimentação de pó e (7) isolante elétrico.

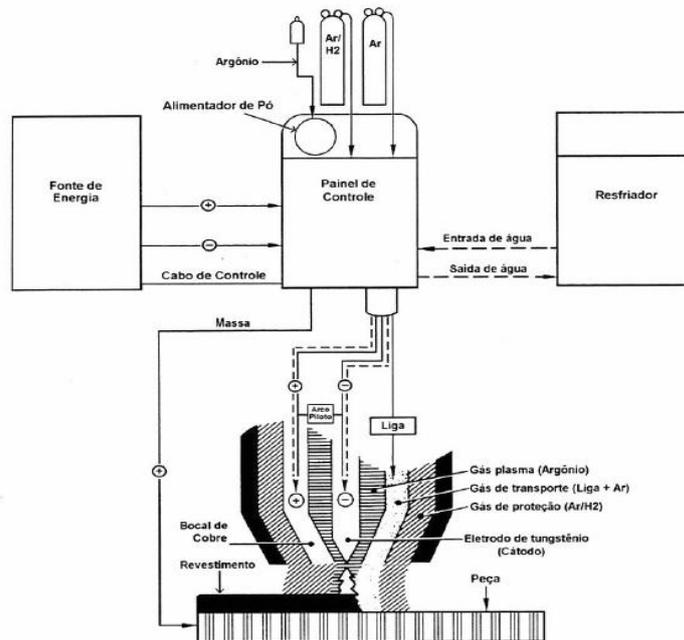


Figura 19 – Corte transversal de uma tocha a plasma (PAWLOWSKI, 2008).

O processo de AT a plasma de arco não transferido tem como características principais (PAWLOWSKI, 2008):

- Distância de aplicação de 60 a 130 mm.
- Consumo de água para refrigeração de 5 l/h.
- Ângulo de aplicação normalmente 90°
- Alimentação de pó geralmente na faixa 50 a 100 g/h.
- Fluxo de gás 3 a 10 l/h.
- Tamanho das partículas de pó usualmente no intervalo de 20 a 90 μm , (0.02 a 0.09 mm).

- A temperatura do substrato deve ser mantida na faixa de 100 a 200 °C quando aspergido cerâmica em metais com a finalidade de se evitar tensões residuais.
- Para melhorar densidade do revestimento e outras propriedades podem ser realizados tratamentos térmicos como recozimento em forno, tratamento a laser e aplicação de selantes.
- Nível de ruído superior a 140 decibéis,

Propriedades do revestimento através do processo a plasma de arco não transferido (PAWLOWSKI, 2008):

- Os valores de aderência da camada variam de 15 a 25 MPa, podendo alcançar 70 MPa para ligas de NiAl, NiCrAl e Mo.
- A porosidade destes revestimentos se situa na faixa de 1 a 7 %.
- Espessuras obtidas de revestimento entre 300 a 1500 μm , (0.3 a 1.5 mm).

2.4.3 Processo de AT por Plasma no Vácuo – VPS

Uma variação do processo é realizada com controle da atmosfera, a técnica VPS (*Vacuum Plasma Spraying* – Aspersão a plasma no Vácuo), também conhecida como LPPS (*Low Pressure Plasma Spraying* – Aspersão a plasma de baixa pressão). Teve seu desenvolvimento iniciado em função da aplicação de revestimentos resistentes à corrosão a quente, seguindo para aplicações de revestimentos de cobre e tântalo puros na indústria eletrônica, (PAWLOWSKI, 2008).

As características desta técnica são basicamente as mesmas da técnica de plasma de arco não transferido, porém operando em atmosfera de baixa pressão em uma câmara em que é mantida com um gás inerte a aproximadamente 100 mbar. E o fato do revestimento ser aplicado numa condição de vácuo, permite produzir um revestimento livre de oxidação. A aplicação dentro da câmara deve ser robotizada para permitir que se tenha manipulação da tocha, conforme mostra a Figura 20.

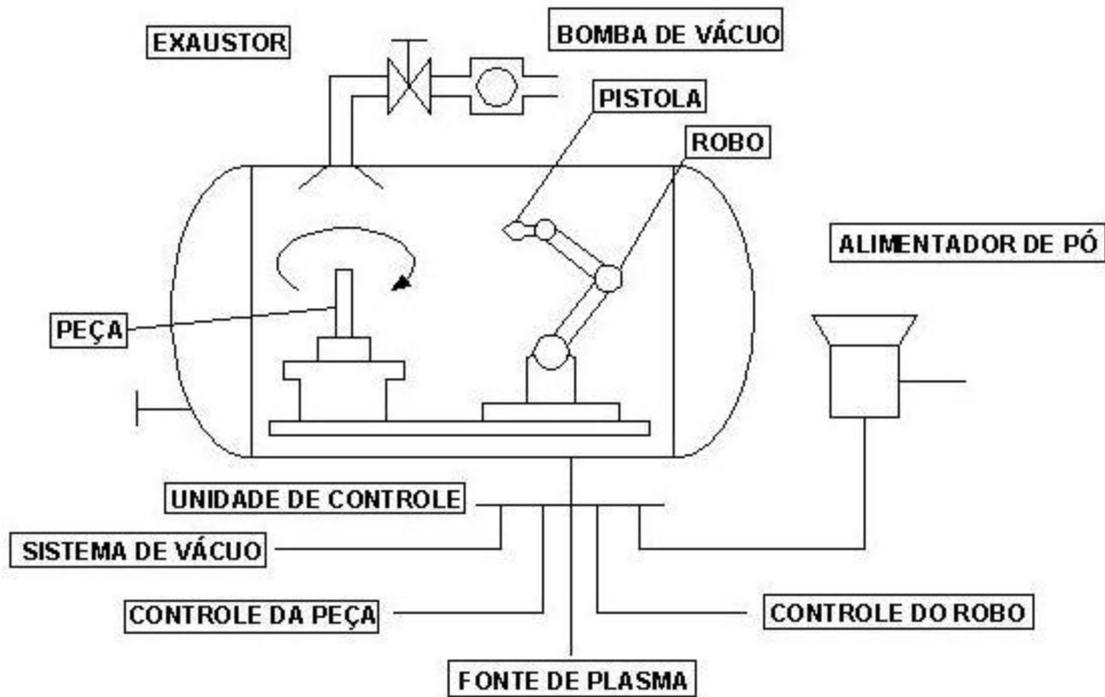


Figura 20 – Esquema do sistema VPS.

O processo de AT a plasma no vácuo tem como características principais (PAWLOWSKI, 2008):

- Distância de aplicação de 300 a 400 mm.
- Fluxo de gases de trabalho de 90 a 200 l/min, podendo ser ar misturado com hidrogênio, hélio ou nitrogênio.
- Tamanho das partículas de pó usualmente na faixa de 5 a 20 μm , (0.005 a 0.02 mm).

Propriedades do revestimento através do processo a plasma no vácuo (PAWLOWSKI, 2008):

- Os valores de aderência das camadas, das ligas mais frequentes depositadas, com a técnica VPS é superior a 80 MPa.
- A porosidade destes revestimentos fica na faixa de 1 a 2 %.
- Espessuras obtidas de revestimento entre 150 a 500 μm , (0.15 a 0.5 mm).

2.4.4 Processo de AT por Plasma em Atmosfera Controlada – CAPS

O processo de AT conhecido como CAPS (*Controlled Atmosphere Plasma Spraying* – Aspersão a plasma em atmosfera controlada) e qualquer técnica a plasma que tenha uma atmosfera de transformação que não é nem ar ambiente e nem a baixa pressão pertence à família CAPS.

A técnica CAPS é usada com dois propósitos: confinar materiais perigosos (tóxicos ou de auto-ignição) e restringir a formação de óxidos que poderiam ocorrer na aspersão ao ar atmosférico. Neste processo, a resistência adesiva é aumentada, pois mais altas temperaturas do substrato permitem a difusão do revestimento.

A técnica de aplicação e a pressão na câmara influenciam na distância de aplicação o que pode variar de 100 a 250 mm. (PAWLOWSKI, 2008)

O processo de AT por plasma em atmosfera controlada tem como características principais (PAWLOWSKI, 2008):

- Revestimento depositados de ligas de WC-Co e NiCrSiB apresentam aderência entre 20 e 45 MPa.
- Espessura de revestimento de 1000 a 2000 μm (1.0 a 2.0 mm) isenta de defeitos superficiais.

2.4.5 Processo de AT por Plasma de Indução – RFPS

Outra variação do processo de AT a plasma é o RFPS (*Radio Frequency Plasma Spraying* - aspersão por plasma de indução). No qual o plasma é gerado por acoplamento eletromagnético, sem o contato com os eletrodos metálicos e apresenta uma atmosfera oxidante. Um aspecto importante desta técnica é uma relativa facilidade de fundir partículas grandes (100-150 μm) devido ao longo tempo de permanência das partículas na chama, em função da baixa velocidade do plasma (da ordem de 10-50 m/s).

2.5 ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO – ASP

O processo de AT conhecido como ASP (*Arc Spray Process* – Processo de aspersão a arco), também é conhecido como processo arco arame. Este processo utiliza um arco elétrico

como fonte de calor para fundir dois arames, de material de deposição, que chegam até o bico da pistola, para se encontrar em um ponto em que é formada uma névoa de gás atomizante.

Até o ponto de encontro os arames estão isolados um do outro e o arco é obtido por diferença de potencial, na faixa de 18 a 40 volts, que funde as pontas dos arames eletrodos. E um jato de gás é dirigido através da zona do arco, destaca o material fundido e projeta as partículas atomizadas sobre o substrato.

Com a finalidade de reduzir a oxidação para aplicações especiais, gases inertes podem ser usados para substituir o ar comprimido como, por exemplo, argônio e hélio.

Como a temperatura do arco varia de 4000 a 6000°C sendo muito maior que o ponto de fusão do material aspergido, (MARQUES, 2003) afirma que algum superaquecimento e volatilização podem ocorrer, particularmente na aplicação de zinco e alumínio. A alta temperatura das partículas pode produzir áreas de reação química ou difusão ou ambas, após o impacto com o substrato. E estas interações são similares a pequenas soldas a ponto de conferir ao revestimento excelente resistência a adesão e coesão.

Na Figura 21 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 tensionador da roda motriz.
- Pistola de arco elétrico consistindo do corpo da pistola, bocal de ar e capa de ar.
- Mangueiras e cabos.

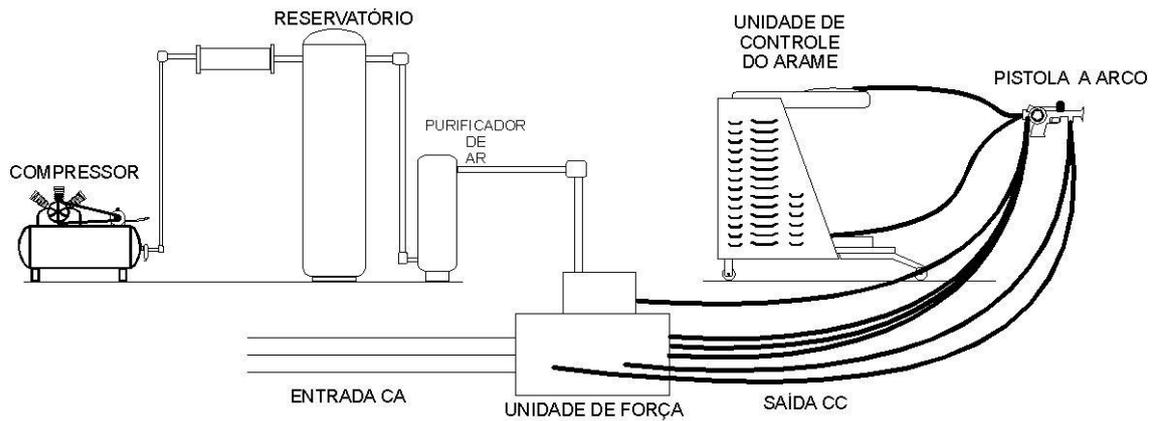


Figura 21 - Esquema de uma instalação para AT de arco elétrico.

Esta técnica difere de outras técnicas de AT nas quais não há fonte externa de calor, tais como chama de gás ou plasma induzido eletricamente. O aquecimento e a fusão ocorrem quando os arames, material de aporte, carregados eletricamente com cargas opostas, um arame é positivo o anodo, o outro negativo o catodo, de acordo com a Figura 22, são alimentados conjuntamente e um arco controlado é gerado quando de sua interseção. Um fator limitante para esta técnica é o fato de os materiais aplicados terem de ser eletricamente condutores conforme (LIMA E TREVISAN, 2002). Na figura 23 observa-se o equipamento de aspersão por arco elétrico do LABATS.

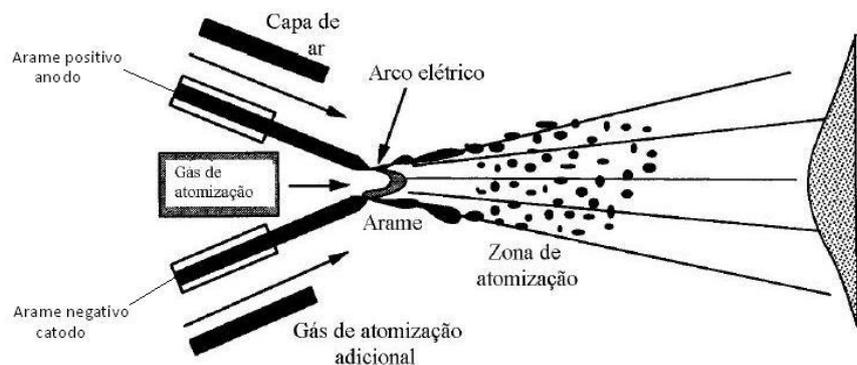


Figura 22 – Esquema do processo a arco elétrico, modificado de (BERNDT e BERNECKI, 2004).

O gás de atomização adicional faz com que as partículas não se aglomerem em seu trajeto até o substrato, camadas de revestimento mais homogêneo.

Por não haver uma chama, ou seja, ausência de gases de combustão tocando o substrato seu aquecimento é menor quando o revestimento é aplicado pela técnica ASP.



Equipamento de Aspersão Térmica à Arco Elétrico

Figura 23. Equipamento de aspersão térmica por arco elétrico (LABATS).

O material dos arames pode ser puro ou ligas de arames sólidos e recentemente este processo teve um avanço com o desenvolvimento de arames tubulares com enchimento metálico.

Propriedades do revestimento através do processo a arco elétrico (PAWLOWSKI, 2008):

- Distância de aplicação de 50 a 170 mm.
- Alimentação de arame de 50 a 1000 g/min.
- Diâmetro mais comum do arame de 1.6 a 5.0 mm.
- Com uma corrente de 280 A a temperatura do arco pode atingir até 5800°C.
- Potência elétrica de 5 a 10 kW.

- Diferença de potencial entre os arames de 20 a 40 volts.
- Pressão do gás de atomização de 0.2 a 0.7 MPa.
- Fluxo de gás de atomização de 20 a 1300 l/min.
- Velocidade das partículas, dos arames fundidos, pode atingir até 150 m/s.

O processo de AT a arco elétrico tem como características principais (PAWLOWSKI, 2008):

- Aderência da camada para zinco e alumínio de 10 a 30 MPa e para ligas de NiAl pode chegar a 70 MPa.
- Porosidade entre 10 a 20%.
- Espessura de camada de 100 a 2000 μm , (0.1 a 2.0 mm).

2.6 TÉCNICA DE ASPERSÃO COLD SPRAY - CGSM

O processo de aspersão com gás frio CGSM (*Cold-Gas Spraying Method*) é uma nova técnica, mas não usa a energia térmica para fundir o material que será depositado. Utiliza a energia cinética para propelir as partículas ao substrato.

Este processo ocorre quando o gás, geralmente nitrogênio ou hélio, é comprimido a 3.5 MPa e aquecido a 600°C armazenando energia até passar por uma câmara convergente – divergente e após a fluxo do gás passar pela câmara ocorre a expansão do gás, o que faz ele chegar a velocidades supersônicas. O material do revestimento na forma de pó utiliza parte do gás pressurizado para chegar até a câmara na qual as partículas são moderadamente aquecidas e aceleradas a uma determinada velocidade e temperatura e no impacto com o substrato se deformam e se ligam a ele formando um revestimento denso. A Figura 24 mostra esquematicamente o processo CGSM.

O gás de trabalho pode ser reutilizado, parcialmente, se captado após seu uso e o material de aporte deve ser selecionado, pois para ser usado nesta técnica deve possuir a característica de se deformar plasticamente. Então como cerâmicas não tem esta habilidade praticamente a deposição é realizada com metais e algumas ligas. Mas a aspersão é realizada com êxito em substratos de metais e cerâmicas inclusive é um bom aderente em superfícies polidas.

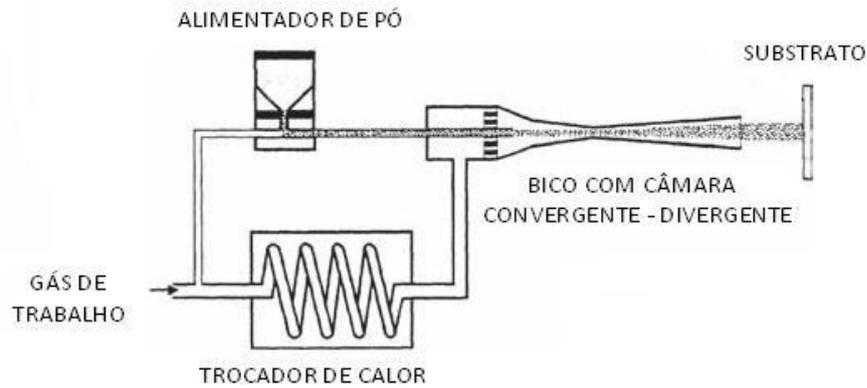


Figura 24 – Esquema do funcionamento da técnica CGSM modificado de (PAWLOWSKI, 2008).

Propriedades do revestimento através da técnica CGSM (PAWLOWSKI, 2008):

- Tamanho das partículas entre 5 a 20 μm (0.005 a 0.02 mm), partículas menores são mais adaptáveis a esta técnica, mas há casos de sucesso com deposição de partículas da ordem de 200 μm .
- Temperatura das partículas de 230°C e velocidade das partículas de 600 m/s foram calculadas com partículas de cobre de tamanho 15 μm .

A técnica CGSM tem como características principais (PAWLOWSKI, 2008):

- A aderência de 26 a 44 MPa para cobre, de 33 a 35 MPa para alumínio e na faixa de 26 a 62 MPa para tântalo.
- Porosidade de 4.5% para cobre, 3.7% para alumínio e 0.12% para NiCr.
- As espessuras variam de 250 μm para NiCr a 650 μm para alumínio.

As TABELAS 2 e 3 mostram de forma resumida informações sobre os processos de aspersão térmica.

Tabela 2 – Conforme (CORTÉS, 1998) os principais parâmetros de controle dos processos de AT.

Processos	Parâmetros	Processos	Parâmetros
Chama convencional FS	Pré-aquecimento	HVOF modelo DJ Metco	Pressão de oxigênio
	Distância		Fluxo de oxigênio
	Fluxo de oxigênio		Fluxo de nitrogênio
	Fluxo de acetileno		Pressão de propano
	Pressão de ar		Fluxo de propano
	Fluxo de ar		Distância
Arco Elétrico ASP	Pressão de ar primário	HVOF modelo TAFA	Pressão de oxigênio
	Pressão de ar secundário		Fluxo de oxigênio
	Diferença de potencial entre os arames		Fluxo de querosene
	Corrente		Pressão de querosene
	Limpeza		Fluxo de água de refrigeração
	Pré-aquecimento		Distância

Tabela 3 – Comparação das características de processos de AT segundo (THORPE, 1993).

Características						
Processos	Vazão de gases (m ³ /h)	Temperatura média da chama na saída (°C)	Atmosfera em torno das partículas	Velocidade de impacto das partículas (m/s)	Aderência relativa (1 a 10)	Coesão interlamelar
Chama (Pó)	11	2200	CO, CO ₂ , H ₂ O	30	3	Baixa
Chama (Arame)	71	2800	N ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O	180	4	Média
Arco (Arame)	71	5500	N ₂ , O ₂	240	6	Alta
Plasma	4.2	5500	N ₂ , Ar, H ₂ , H ₂ O	240	6	Alta
Detonação	11	3900	N ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O	910	8	Muito Alta
HVOF	28 - 57	3100	N ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O	610 - 1060	8	Muito Alta
Plasma de alta energia	17 - 28	8300	N ₂ , Ar, H ₂ , H ₂ O	240 - 1220	8	Muito Alta
Plasma a vácuo	8.4	8300	Ar, He	240 - 610	9	Muito Alta

Características					
Processos	Teor de óxidos (%)	Custo relativo (1 a 10)	Taxa de deposição (kg/h)	Potência (kW)	Energia para fusão (kW/kg)
Chama (Pó)	6	3	7	25 - 75	11 - 22
Chama (Arame)	4	3	9	50 - 100	11 - 22
Arco (Arame)	0.5 - 3	1	16	4 - 6	0.2 - 0.4
Plasma	0.5 - 1	5	5	30 - 80	13 - 22
Detonação	0.1	10	1	100 - 270	220
HVOF	0.2	5	14	100 - 270	22 - 200
Plasma de alta energia	0.1	4	23	100 - 250	9 - 13
Plasma a vácuo	ppm	10	10	50 - 100	11 - 22

As TABELAS 4 e 5 mostram as vantagens e desvantagens para os processos de aspersão térmica. E a TABELA 6 mostra aplicações em indústrias petroquímicas para aspersão térmica.

Tabela 4 – Apresenta as vantagens relacionadas aos processos de aspersão térmica. (GIMENEZ et al.).

Detonação	Excelente coesão	
	Camada com baixo índice de porosidade	
	Grau de acabamento muito bom durante os trabalhos posteriores	
Chama Oxiacetilênica	Permite a aplicação de 3 tipos de camadas: - Ligas para camadas fundidas, resistentes a corrosão e oxidação - Ligas com carbetos, recomendados onde as condições de abrasão são severas - Ligas com cerâmicas, resistentes ao desgaste, calor e abrasão e também funcionam como isolantes térmicos e elétricos	
	Arco elétrico	Maior aderência
		Maior coesão entre as partículas
Maior velocidade de deposição chegando a aplicar 30 kg/h		
Materiais mais usados são: aço inoxidável martensítico e austenítico, bronze, alumínio, cobre, molibdênio e carbetos		

HVOF	Menor porosidade
	Maior dureza
	Menor quantidade de óxidos
	Melhor resistência ao desgaste
	Maior adesão
Plasma	Propriedades físicas e metalúrgicas das camadas depositadas superiores às aplicadas pelos outros processos
	Porosidade reduzida
	Melhor aderência
	Menor conteúdo de óxidos

Tabela 5 - Apresenta as desvantagens relacionadas aos processos de aspersão térmica (GIMENEZ et al).

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

Tabela 6 – Revestimentos produzidos por aspersão térmica para aplicação em petroquímicas, (BERNDT e BERNECKI, 2004).

Componente	Aplicação	Técnica utilizada	Tipo de revestimento
Válvula esfera	Desgaste Corrosão	HVOF	Carbeto de tungstênio
Válvula gaveta	Desgaste Corrosão	HVOF	Carbeto de tungstênio
Haste de êmbolo	Desgaste	Chama oxiacetilênica	Óxido de cromo
Plataformas de petróleo	Corrosão	Chama oxiacetilênica	Alumínio
Carcaça de bombas	Restauração dimensional	Arco elétrico	Alumínio - bronze
Cilindro de compressores	Restauração dimensional	Arco elétrico	Aço inoxidável 420
Tanques de processamento	Corrosão	Chama oxiacetilênica	Alumínio

3. PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE

Com a escolha do processo de aspersão e do material de aporte a próxima etapa é a preparação da superfície para garantir a qualidade de adesão do revestimento, pelo principal mecanismo que é a ancoragem mecânica. O procedimento para preparar o substrato tem a finalidade de deixar a superfície ativa permitindo que as partículas propelidas tenham, no momento do impacto, a máxima potencialização de aderência. E esta ativação da superfície é mediante a quatro etapas.

- Limpeza
- Rugosidade da superfície
- Camada de ligação
- Pré-aquecimento

3.1 LIMPEZA

O primeiro passo na preparação do substrato para a AT é manter isenta de qualquer tipo de contaminante como, por exemplo, ferrugem, crosta de óxido de ferro, graxa, óleos e umidade presente na superfície para que não impeça o contato do material aspergido com a superfície.

A superfície dos materiais metálicos quando expostas ao ar atmosférico mesmo em um intervalo de tempo muito pequeno adquire um filme de óxido e sobre esta película agrega-se água, óleos, poeiras recebendo o nome de superfície real este conjunto de camadas. Então após a limpeza não se pode demorar para aplicação do revestimento ou tem que se prever um modo de proteção da superfície impedindo a exposição a contaminantes.

Para caracterização do tipo de limpeza necessária, padrões e métodos contidos em normas como a ABNT NBR 6405, a ISO 8501-1 e a norma sueca SIS 055900/67 auxiliam nesta obtenção, prevendo a inspeção da superfície através de padrões comparáveis visualmente como mostra a Figura 25.

A limpeza pode ser realizada de forma mecânica ou química. O processo de limpeza mecânica consiste na premissa de abrasão em que camadas da superfície serão removidas através da interação com um material de maior dureza e este processo pode ser realizado lixamento, escovação ou jato abrasivo.

O jato abrasivo é um processo no qual partículas de um material duro são lançadas contra a superfície, através de ar comprimido. E muitas vezes utilizado para obter a limpeza e ao mesmo tempo a rugosidade necessária e de acordo com a norma ISO 8501-1 o grau de limpeza Sa é classificado como:

- Sa1 – tratamento por jateamento abrasivo ligeiro – norma NACE 4 - a superfície deve estar isenta de óleo, gordura, sujeiras visíveis, carepa de laminação, ferrugem, tinta e matérias estranhas de fraca aderência.
- Grau Sa 2 - tratamento por jateamento abrasivo comercial – norma NACE 3 - quase toda a carepa de laminação, ferrugem e material estranho devem ser removidos. A superfície deve apresentar, então, coloração acinzentada.

- Grau Sa 2.1/2 - tratamento por jateamento abrasivo ao metal quase branco – norma NACE 2 – as carepas de laminação, a ferrugem e material estranho devem ser removidos de maneira tão perfeita que seus vestígios apareçam somente como manchas tênues ou estrias.
- Grau Sa 3 - tratamento por jateamento abrasivo ao metal branco – norma NACE 1 - as carepas de laminação, a ferrugem e material estranho devem ser totalmente removidos. A superfície deve apresentar, então, coloração metálica uniforme.

A norma ISO 8501-1 também classifica os graus de corrosão em superfícies de aço.

- Grau A - superfície de aço completamente coberta de carepa de laminação intacta e aderente, com pouca ou nenhuma corrosão.
- Grau B - superfície de aço com princípio de corrosão atmosférica da qual a carepa de laminação tenha começado a desagregar.
- Grau C - superfície de aço da qual a carepa de laminação tenha sido removida pela corrosão atmosférica ou possa ser retirada por meio de raspagem, e que apresenta pequenos alvéolos.
- Grau D - superfície de aço da qual a carepa de laminação tenha sido removida pela corrosão atmosférica e que apresenta corrosão alveolar de severa intensidade.

Para a seleção do material abrasivo deve se evitar aqueles esféricos ou com cantos arredondados, eles devem ter cantos vivos que irá favorecer a formação de irregularidades na superfície que posteriormente serão pontos de ancoragem do revestimento. E para sua utilização os abrasivos devem estar limpos e secos e sem contaminantes, podendo ser reutilizados desde que no mínimo 80% do volume de material mantenha granulometria original. A TABELA 7 resume algumas características dos abrasivos para jateamento.

Segundo (MENEZES, 2007) O ângulo de jato abrasivo deve estar compreendido entre os ângulos de 75° a 90°. A distância do bocal a superfície pode variar de 10 a 30 cm de acordo com o tamanho e o tipo de abrasivo usado, a abertura do bocal e a capacidade do equipamento. Com relação ao tempo, deve-se ficar atento, pois jateamento excessivo pode resultar em textura de superfície inadequada, sendo o controle realizado por inspeção visual.

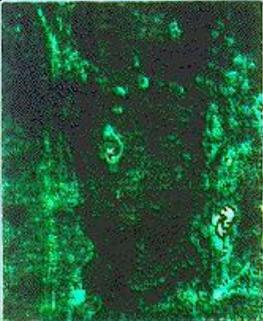
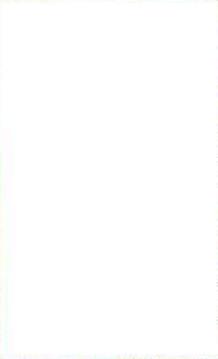
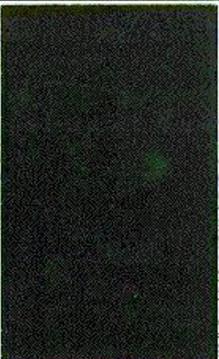
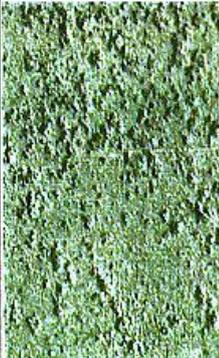
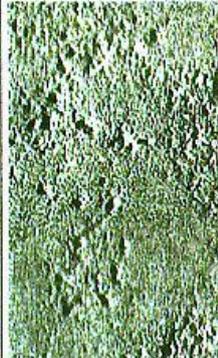
Graus de Corrosão	Graus de Limpeza			
	Sa1	Sa2	Sa2 1/2	Sa3
A 				
B 				
C 				
D 				

Figura 25 – Graus de corrosão e limpeza segundo a norma SIS 055900/67.

Tabela 7 – Características de abrasivos usados para jateamento (MARQUES, 2003).

Meio abrasivo	Origem	Principal componente químico	Forma	Densidade (g/cc)	Perda % *	Dureza Rockwell C
Aço coquilhado	Fabricado	Ferro	Angular	7.65	0	100
Ferro coquilhado	Fabricado	Ferro	Angular	7.40	8	97
Óxido de alumínio virgem	Fabricado	Alumínio	Cúbico	3.80	24	76
Óxido de alumínio reciclado	Fabricado	Alumínio	Cúbico	3.76	34	66
Granalha	Natural	Ferro Silício	Cúbico	4.09	46	54
Escória mineral	Fabricado	Sílica, Alumínio e Ferro	Cúbico	2.79	61	39
Areia silicosa	Natural	Sílica	Cúbico	2.61	77	23
Areia silicosa	Natural	Sílica	Angular	2.63	90	10
Carbeto de silício	Fabricado	Carbeto de Silício	Blocos	3.81	57	43
Areia comum	Natural	Sílica	Angular	2.62	84	16
* - Quantidade da amostra reduzida a um tamanho inaceitável num teste de jateamento padrão						

Somente lembrando no Brasil é proibido a utilização de areia como material abrasivo, pois causa sérios danos a trabalhadores expostos a poeira resultante do processo.

Mas um engano pode ser cometido quando se pensa em que apenas jateamento abrasivo é suficiente para a limpeza de uma superfície, pois compostos orgânicos como óleos e graxas quando estão presentes na superfície, podem não ser removidos com o jato de abrasivos. Mas também podem fazer com que o abrasivo se acumule na superfície, aumentando a contaminação então é prudente que antes do jato abrasivo a superfície passe por um processo de limpeza químico.

A limpeza química é dividida em 3 categorias a detergência, o desengraxe e a decapagem ácida.

- A detergência ou limpeza alcalina é um dos meios mais eficientes para a remoção de graxas, óleos pó e partículas de metais.
- A limpeza desengraxante remove impurezas através de vapor quente e é um bom agente quanto a óleos e graxas com grau de contaminação leve.
- A decapagem é um modo eficaz de remoção de camadas de óxidos, hidróxidos e sulfetos.

Outra forma de limpeza também pode ser empregada como a limpeza ultrasônica destinada a expelir contaminantes impregnados em locais confinados.

3.2 RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE

O próximo processo realizado após a limpeza do substrato é prepará-la para apresentar uma rugosidade apropriada para proporcionar uma adesão que garanta a qualidade do revestimento. A introdução da rugosidade correta fará com que esta não interfira na rugosidade final do revestimento aspergido.

Uma superfície rugosa tem mais área superficial de que uma superfície polida então as partículas terão mais área de contato, zona ativa, para se aderirem ao substrato, pois terá mais pontos de ancoramento mecânico. E eliminará os planos preferenciais de cisalhamento que existem nas camadas depositadas em virtude da sua estrutura típica lamelar. Desenvolvem-se nestas camadas grandes tensões paralelas à base que são responsáveis pela sua baixa resistência à tração e isto pode ser verificado quando se fazem testes de aderência.

A avaliação dos parâmetros de rugosidade pode ser feita de acordo com a ABNT NBR 6405:

Rugosidade média (R_a) - parâmetro calculado efetuando-se a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i) dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média de medição (l_m). A Figura 26 e a Fórmula 1 demonstram esta medição. A TABELA 8 apresenta os valores mínimos de comprimentos

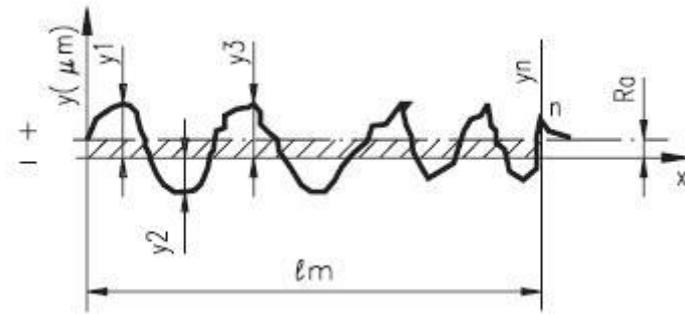


Figura 26 – Esquema de medição de Ra.

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (1)$$

Tabela 8 – Valores de Ra para comprimentos mínimos de amostragem (ABNT NBR 6405).

Rugosidade Ra (μm)	Comprimento de amostragem (mm)	Percurso de medição ℓm (mm)
até 0.1	0.25	1.25
de 0.1 até 2	0.80	4.00
de 2 até 10	2.50	12.50
acima de 10	8.00	40.00

Rugosidade máxima (Ry) – é a máxima distância ente um pico e um vale (Zi) apresentado no percurso de medição (ℓm). Para o caso para a Figura 27 o valor da rugosidade Ry que esta compreendida entre (ℓm) tem a somatória da máxima altura e a máxima profundidade no trecho Z3.

Rugosidade média (Rz) – é a media aritmética de 5 valores da rugosidade parcial Z, definida como à soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existente num comprimento de amostragem (ℓe), como mostrado na Figura 27 e matematicamente pela Fórmula 2.

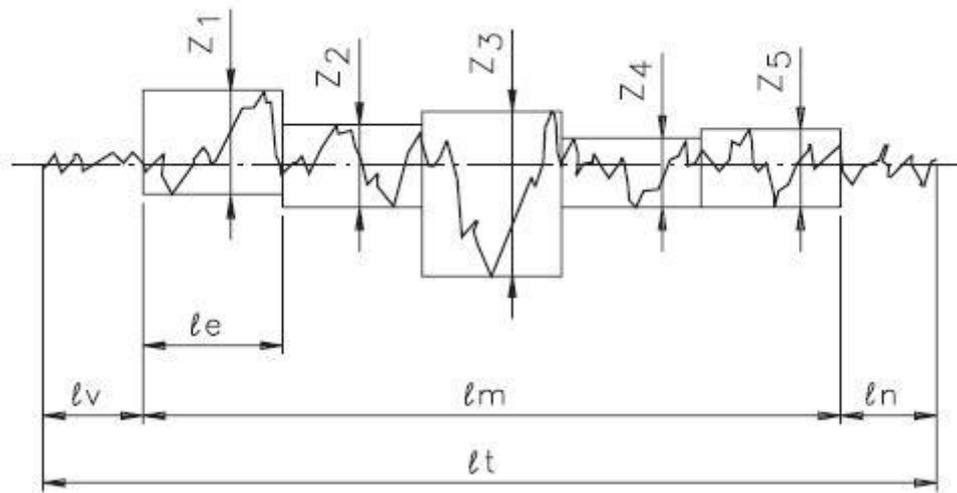


Figura 27 – Esquema de medição exemplificando a medição de Ry e Rz.

$$Rz = \frac{Z1 + Z2 + Z3 + Z4 + Z5}{5} \quad (2)$$

Conforme (LIMA E TREVISAN, 2002) afirma de um modo geral, a rugosidade superficial mais adequada para a maioria dos revestimentos é aquela que apresenta Ra numa faixa de 2.5 a 13 μm , entretanto se a espessura do revestimento é pequena, a faixa de rugosidade necessária estará na faixa de 1.3 μm . E a força de adesão, normalmente, aumenta com a rugosidade da superfície, contudo para Ra superior a 10 μm esta melhora decresce. E a melhor adesão esta associada com a rugosidade comparada a $\frac{3}{4}$ do diâmetro das partículas do revestimento.

A obtenção desta rugosidade pode ser obtida através de jateamento abrasivo ou usinagem. O jateamento abrasivo é a técnica mais utilizada para se obter a rugosidade adequada. Como já comentado anteriormente a correta escolha do abrasivo é de fundamental importância, pois se evitando abrasivos esféricos não se tem uma superfície com textura martelada o que não é bom para AT. Abrasivos duros e pontiagudos podem penetrar e ficar incrustados em um substrato mole.

O tempo suficiente para um jato localizado produzir a rugosidade adequada segundo a norma PETROBRAS 2568 é na faixa de 3 a 4 segundos, diminuir este tempo reduz a rugosidade Ra e tempos superiores a 4 segundos não implica em aumentar a rugosidade Ra. E a distancia do bocal de aplicação não é indicado para valores superior a 100 mm, pois as partículas colidem

ente si antes de atingir o substrato e perdem energia durante o vôo afetando a eficiência deste processo. A Tabela 9 mostra condições usuais de jateamento abrasivo.

Tabela 9 – Condições usuais de jateamento para obtenção de rugosidade adequada, adaptado de (MARQUES, 2003).

Tamanho do abrasivo	Material abrasivo	Pressão de ar (kPa)	Diâmetro do bocal (mm)	Tipo de equipamento	Substrato	Rugosidade Ra (mm)
24	Óxido de alumínio	414	7.9	Pressão	Aço	13
60	Carbeto de silício ou óxido de alumínio	414	7.9	Sucção	Inox	6
80	Óxido de alumínio	414	7.9	Pressão	Plástico	6

O jateamento abrasivo pode ser conseguido através de dois tipos de equipamentos um que usa pressão e outro que a sucção. A rugosidade obtida por uma máquina que usa a pressão é conseguida com 2.5 vezes menos pressão que a máquina que utiliza sucção.

O ângulo de jateamento influencia na qualidade da textura da superfície conforme mostra a Figura 28.

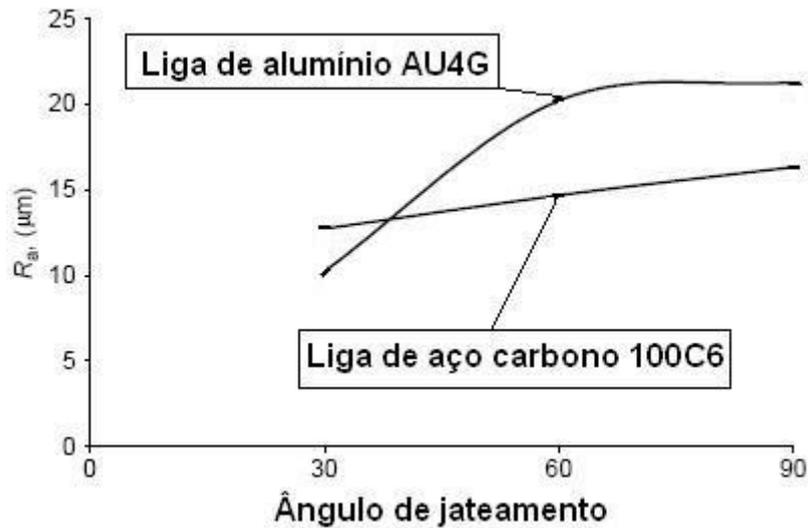


Figura 28 – Influência do ângulo de jateamento para materiais de durezas diferentes modificado de (PAWLOWSKI, 2008).

3.3 CAMADA DE LIGAÇÃO

Há necessidade de aplicar camadas de ligação em materiais que são muito duros para ter suas características superficiais alteradas, ou são muito mole que qualquer mudança causaria deformação. Segundo (LIMA E TREVISAN, 2002) os materiais de ligação são aqueles que têm afinidade para formar com o material do substrato uma forte ligação interatômica, física ou de difusão. E geralmente são finas e são responsáveis por produzir uma superfície rugosa para a adesão do revestimento.

Camadas de ligação são aplicadas, normalmente, em aços endurecidos por tratamento de tempera e superligas. Tem seu uso requerido também onde o jateamento abrasivo ou a usinagem não podem ser utilizados.

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

3.4 PRÉ – AQUECIMENTO DO SUBSTRATO

O pré-aquecimento é importante e deve estar no escopo de trabalho da preparação do substrato para a AT, tendo como objetivo proporcionar a queima e volatilização de graxas, óleos e da umidade que ficam retidos na superfície do metal. Entretanto, expor o substrato a altas temperaturas por tempos prolongados podem resultar na produção de espessas camadas de óxidos

O aquecimento pode ser realizado pela chama redutora da própria pistola de AT, por um equipamento independente ou se o tamanho da peça for apropriado também pode ser por indução. As temperaturas recomendadas para o substrato estão na faixa de 90 a 150°C.

O pré-aquecimento favorece a redução das tensões internas influenciando na aderência do revestimento. E pelo fato da superfície estar aquecida, gerando uma dilatação, que após ser realizado a aspersão e cessado o pré-aquecimento a contração do substrato reforçará mais ainda o ancoramento mecânico. A Figura 29 mostra panquecas de alumínio depositadas, em um só passe, com e sem pré-aquecimento.

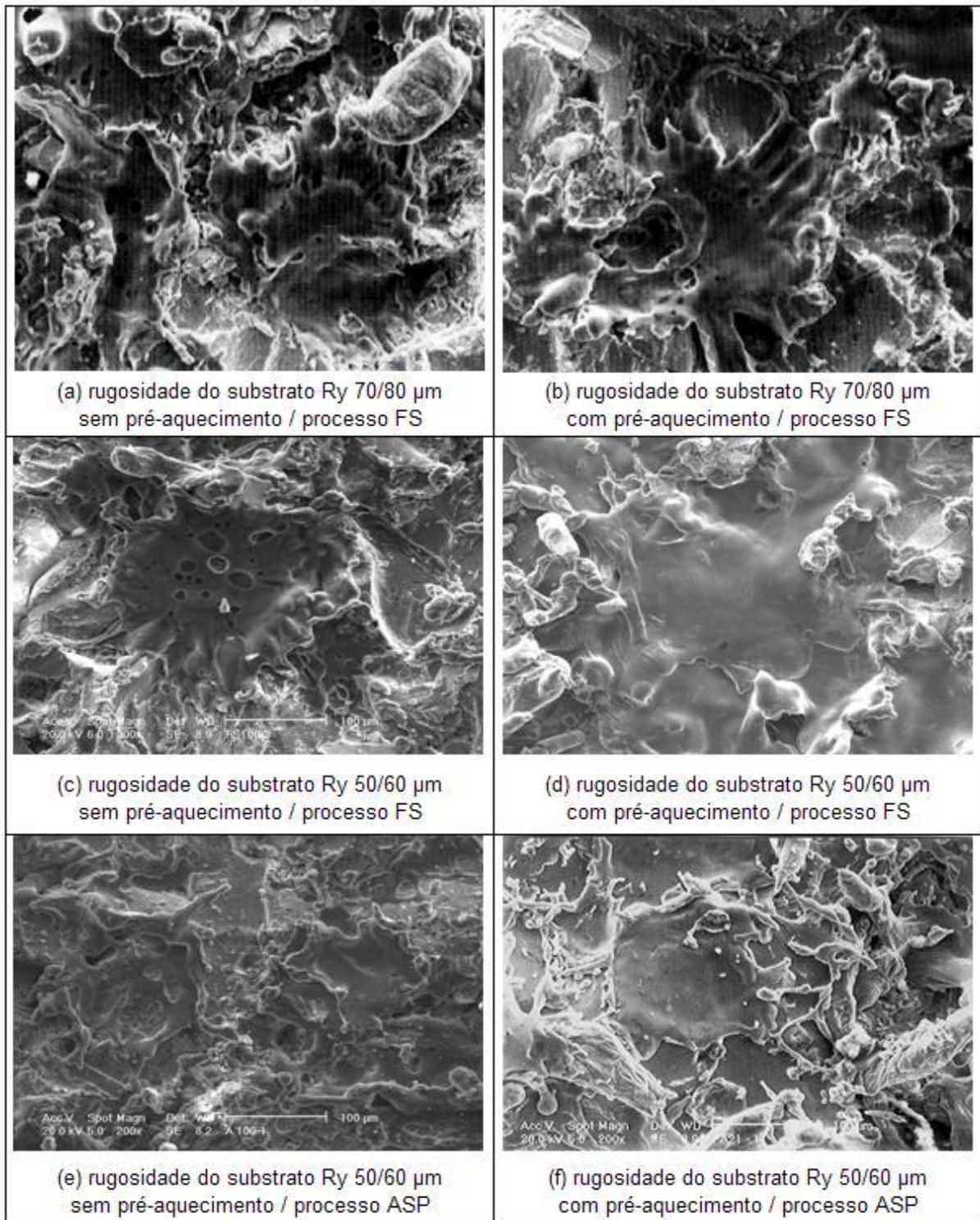


Figura 29 – Morfologia de panquecas de alumínio depositadas, (CORTÉS, 1998).

Podendo-se afirmar que a menor rugosidade e o pré-aquecimento do substrato melhoram significativamente o efeito molhamento, permitindo a atuação mais contundente do mecanismo de ancoramento mecânico da partícula no substrato, verificando-se:

- (a) – partícula depositada sem forma de panqueca e com muitos salpicos.
- (b) – mostra a panqueca mais homogênea, com poros e menos salpicos.
- (c) – apresenta pequenos poros no centro da panqueca e salpicos ao seu redor.
- (d) – panqueca totalmente homogênea, sem poros e sem salpicos.

A partícula sem pré-aquecimento não produz o efeito molhamento homogêneo e ainda apresenta muitos salpicos que reduz a aderência. E no substrato com o pré-aquecimento o fenômeno molhamento foi favorecido, formando uma panqueca homogênea, porém com alguns salpicos, que não prejudicam a aderência neste caso.

- (e) – partícula depositada sem aspecto de panqueca, com pequenas áreas cobertas com alumínio e muitos salpicos.
- (f) – panqueca mais homogênea, sem poros, menos salpicos e houve uma maior acomodação da panqueca a textura do substrato.

4 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DOS REVESTIMENTOS DEPOSITADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA

O processo de AT e o procedimento de aplicação conferem ao revestimento propriedades e ciclo de vida que diferem ente si. E esta variação dificulta a comparação de resultados e características, pois uma série de variáveis estão envolvidas como, por exemplo, material do revestimento, distribuição dos tamanhos de partículas a serem aspergidas, velocidade de solidificação, velocidade do fluxo, pressão e tipo de gás. Ainda também as características do substrato influenciam na qualidade do revestimento como material, temperatura, rugosidade e limpeza.

4.1 MACROESTRUTURA

A macroestrutura também conhecida como lenticular ou lamelar dos revestimentos aspergidos recebem este nome por que quando o material do revestimento é propelido formando depósitos de sucessivas camadas de gotículas líquidas que devido a energia cinética que lhe são

conferidas no momento do impacto se achatam e se solidificam a uma velocidade extremamente alta e se ancoram mecanicamente no substrato.

Uma estrutura típica de revestimentos aspergido é constituída de lamelas do material depositado permeando sobre esta inclusões de óxidos, micro trincas, partículas sólidas e porosidade e isto é considerado como imperfeições ou defeitos contidos em uma camada de revestimento. A Figura 30 exemplifica uma estrutura de revestimento típica.

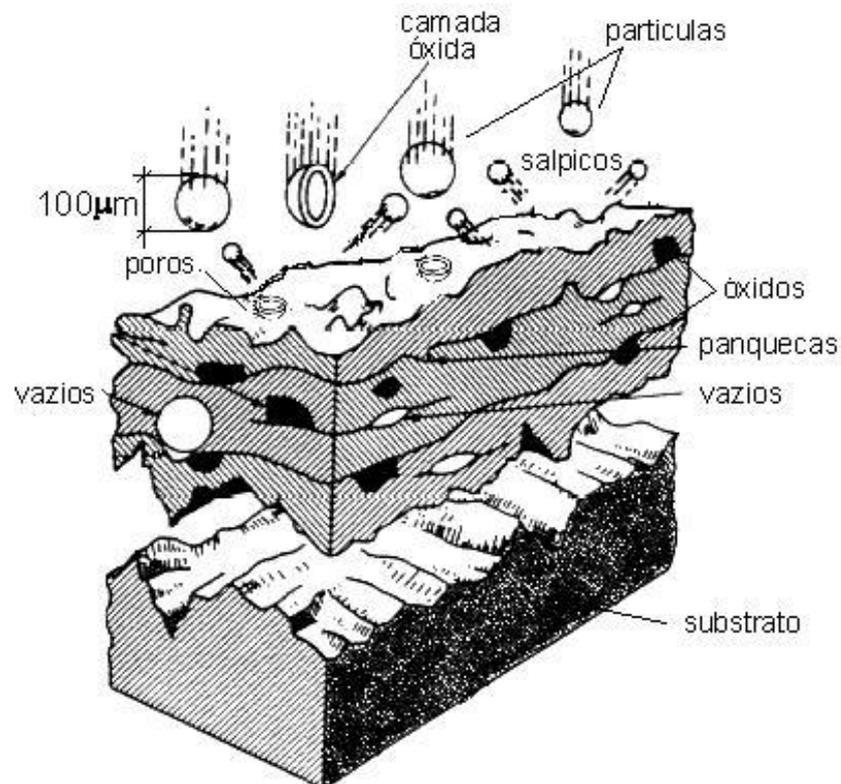


Figura 30 – Camada típica depositada pelo processo de aspersão térmica (CORTÉS, 1998).

No impacto com o substrato ou com o próprio revestimento, as partículas aspergidas podem estar total ou parcialmente líquidas. Isto porque na prática, um mesmo jato resulta em uma ampla faixa de distribuição de velocidades e temperaturas, conforme mostra a Figura 31. No impacto, as partículas sólidas irão rebater ou serão aprisionadas, formando ligações fracas com o resto do revestimento. Este é um dos motivos porque os parâmetros de aspersão, para a maioria dos métodos de deposição, devem ser otimizados de tal forma que a grande maioria das partículas seja fundida no jato.

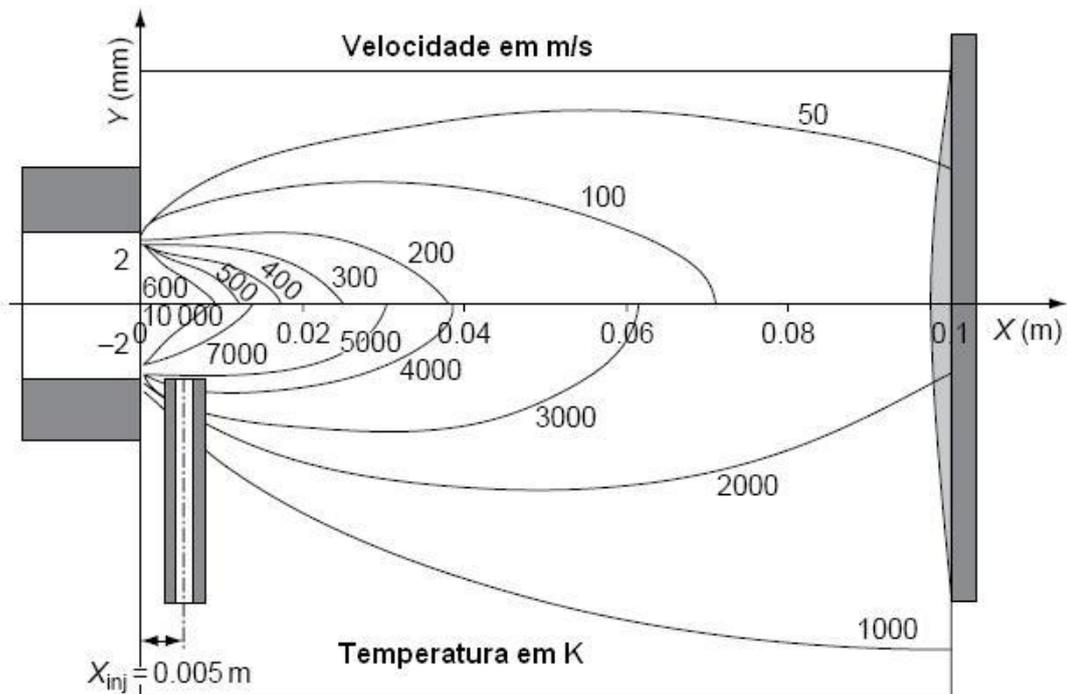


Figura 31– Os perfis de velocidade e temperatura, em Kelvin (K), de acordo com a distância da tocha até o substrato, do fluxo de plasma, no processo APS utilizando Ar + H₂ gerados por uma tocha F-4, (PAWLOWSKI, 2008).

4.2 POROSIDADE

A porosidade consiste em cavidades isoladas e de poros interconectados. É importante ressaltar que, através da AT, obtêm-se revestimentos com porosidade variável, normalmente considerada inerente a estes processos. Ela afeta diretamente propriedades físicas como condutividade elétrica e térmica, diminui a coesão das camadas e sua aderência ao substrato.

A quantidade de poros nos revestimentos aspergidos termicamente depende do material e das condições de aspersão de cada processo como, por exemplo, temperatura da chama ou do arco elétrico, gás de transporte, velocidade das partículas, distancia da pistola e substrato e qualidade do substrato a ser aspergido.

Resultados experimentais apontam para dois tipos de porosidade associados aos revestimentos:

- Poros grosseiros, muitas estão presentes devido ao incompleto preenchimento dos interstícios entre as partículas previamente depositadas tendo mais frequência de aparecimento é proveniente de uma falta de fusão das partículas no momento do impacto, ou falta de energia cinética para conseguir se deformar. Conforme a Figura 32 um ângulo alfa (α) pequeno gera uma maior dificuldade para o total preenchimento do espaço quando outra partícula colidir com o anteparo o que não ocorre quando o ângulo alfa é superior a 90° o caminho para ocupar todos os espaços torna se mais facilitado.
- Poros extremamente finos encontrados nos revestimentos aspergidos têm sido interpretados como incompleto contato entre lamelas durante a formação da camada de revestimento.

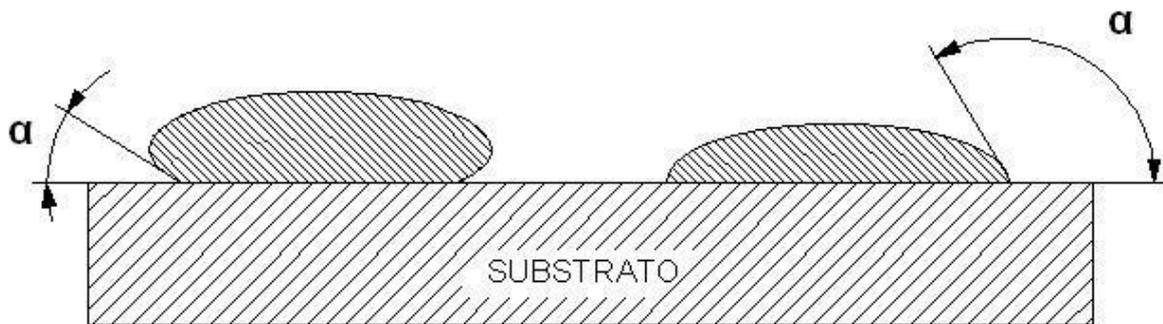


Figura 32 – Esquema de partículas aspergidas fazendo analogia com a tensão superficial de fluidos.

A porosidade que expõem o substrato é conhecida como permeabilidade. E é extremamente prejudicial às propriedades do revestimento bem como também em manter a integridade do substrato, pois se o revestimento é uma barreira contra a corrosão e a permeabilidade possibilita o contato com o meio corrosivo com o substrato, todo trabalho protetivo através do revestimento será perdido. Em geral, é considerado que camadas com mais de 300 μm de espessura evitam o contato do meio corrosivo com o substrato.

Conforme (CORTÉS, 1998) um procedimento utilizado para reduzir os níveis de porosidade é o *Shot Peening* (jateamento com granalhas esféricas). Foi utilizado em tubulações para minimizar a porosidade de superfícies de Al depositado por ASP, permitindo uma redução da faixa de porosidade de 4.33 -13.63 % após a AT, à faixa de 0.16 - 0.83 %, e um aumento leve na microdureza. Então se conclui, diante dos resultados, que o tratamento por *Shot Peening* é

benéfico, produz endurecimento, compactação e diminuição da rugosidade superficial da camada. A compactação superficial da camada de alumínio permitiu reduzir a porosidade superficial e melhorar a coesão da camada.

Outra maneira de diminuir a porosidade é controlar o ângulo de aplicação, a porosidade apresenta menor valor quando o ângulo se aproxima de 90° e sendo como um limite inferior o ângulo de 45° que abaixo deste também há um comprometimento de outras propriedades do revestimento.

A formação de revestimentos contendo porosidade está relacionada com os parâmetros de cada processo de AT, tais como: temperatura da chama ou arco elétrico, gás de transporte, velocidade das partículas, distância pistola/substrato e qualidade do substrato a ser revestido.

Com base na Tabela 8 passa-se a analisar a influência da porosidade e óxidos para o caso de camadas de Al depositadas pelos processos de aspersão a chama FS (pó e arame), HVOF (pó) e ASP (arame).

Tabela 8. Parâmetros característicos dos processos de AT [2,9]

Processo → Parâmetros ↓	FS [pó]	FS [arame]	HVOF [pó]	ASP [arame]
Temperatura Chama/Arco [°C]	2200-3200	2800 -3200	2700 – 3100	4000-6000
Veloc. Transferência [m/s]	30 - 150	100 - 250	400 – 1200	100 - 250
Atmosfera da Chama/Arco	CO - CO ₂ - H ₂ O	N ₂ - CO CO ₂ - H ₂ O	N ₂ - CO CO ₂ - H ₂ O	N ₂ - O ₂
Teor de Óxidos [%]	0,4 - 10		1 - 5	2,5 - 15
Porosidade [%]	5 - 15		<3	3 - 15
Aderência [MPa]	4 - 20		> 36	10 a 36

Processo a chama oxiacetilênica FS:

Neste processo as partículas de Al oxidam principalmente pelo contato com o oxigênio contido no ar utilizado para transferir as partículas fundidas até o substrato e posteriormente com o ar do meio ambiente. Os teores de óxidos variam de 0,4 % até 10 % [9]. A faixa de porosidade é ampla 5 a 15% e, está relacionada com a formação de poros entre e nas panquecas depositadas.

Processo a chama de alta velocidade HVOF:

Em geral as camadas de distintos materiais depositadas por este processo tem pouca porosidade e óxidos, principalmente porque é utilizado gás nitrogênio para transferir as partículas através da chama até o substrato. Para esse processo a literatura consultada não fornece dados das propriedades dos revestimentos de Al puro. Os dados de porosidade da Tabela 2 são provenientes da referência [2,8], destacando-se que a porosidade é a mais baixa dos três processos de aspersão térmica em estudo.

Processo a arco elétrico ASP:

Processo que utiliza ar comprimido para transferir as partículas fundidas até o substrato. Os teores de óxidos são variados, 2,5/3 % e 15%, a oxidação das partículas depende da fonte de calor, da distância pistola/substrato e pressão do ar comprimido.

A porosidade das camadas de Al foi significativamente reduzida com o desenvolvimento das pistolas do tipo “bico fechado” que evita o aglomeramento das gotas na transferência até o substrato. Além disso, a distancia pistola/substrato (<150 mm) é considerada fundamental na obtenção de níveis baixos (<5%) de porosidade, o que pode ser observado através da Figura 33.

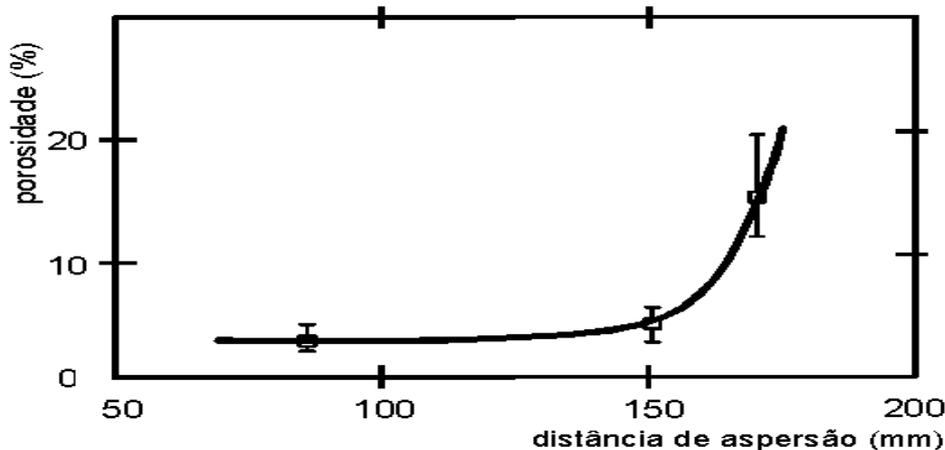


Figura 33. Relação entre porosidade e distância de aspersão - ASP [10]. Consumível: arame de Al 5%Si. - Substrato: aço carbono - Corrente: 150 A- Voltagem: 27,5 V- Pressão do Ar Atomização: 0,45 MPa.

Como a porosidade é inerente na AT, utiliza-se a selagem. Este é um dos tratamentos realizados após terminada a AT para impregnação ou vedação de poros. A existência de poros passantes até o substrato pode vir a caracterizar um problema se a camada depositada for de Al sobre aço. Com a existência de poros passantes o agente corrosivo pode chegar ao substrato, dando origem a uma corrosão mais acentuada em certos meios. A vedação dos poros reduz a área exposta, minimizando a corrosão, em especial quando o depósito é catódico em relação ao substrato. Os selantes são resinas sintéticas e entre estas estão algumas que são revestimentos

orgânicos, que além de fazerem a selagem, também podem atingir espessuras grandes e películas protetoras.

Um procedimento utilizado para reduzir os níveis de porosidade é o Shot Peening (jateamento com granalhas esféricas). Foi utilizado em tubulações para minimizar a porosidade de superfícies de Al depositado por ASP, permitindo uma redução da faixa de porosidade de 4.33 -13.63 % após a AT, à faixa de 0.16 - 0.83 %, e um aumento leve na microdureza depois do Shot Peening.

Realizado shot peening em revestimentos de alumínio apresentados nas Figuras 34 até 40 pode-se observar o efeito benéfico deste recurso técnico.

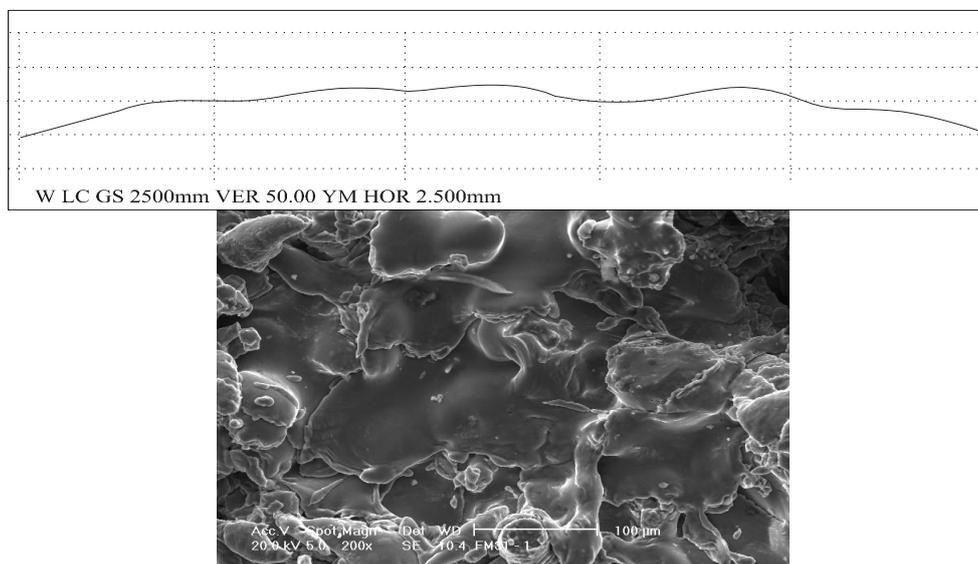


Figura 34. Microestrutura da superfície depositada por AT FS e curva equivalente da rugosidade da camada de Al. ($R_y = 83.1/73.1/100.6/78.3/74.8$. média = 82.0 μm).

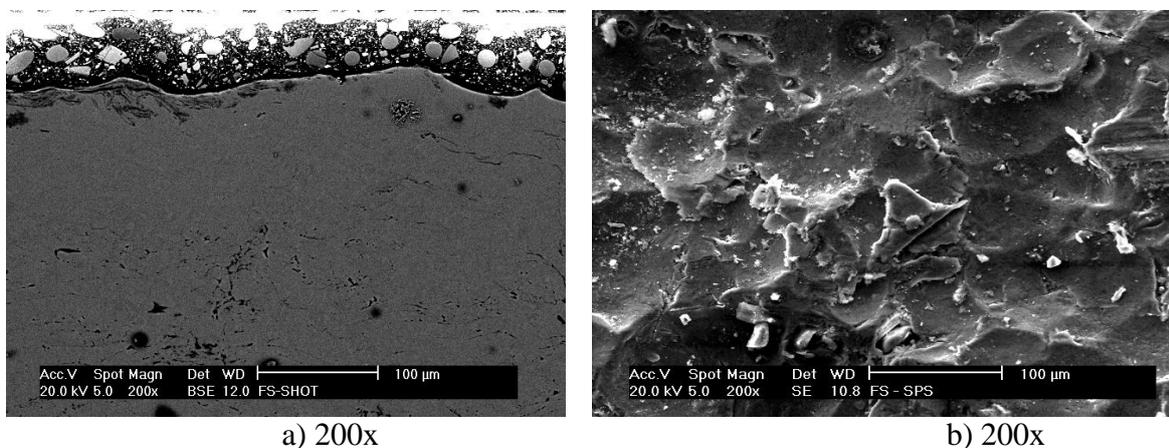


Figura 35. Microestrutura do efeito do “shot peening” (a) vista corte transversal (b) vista sobre cp. aluminizado pelo processo FS.

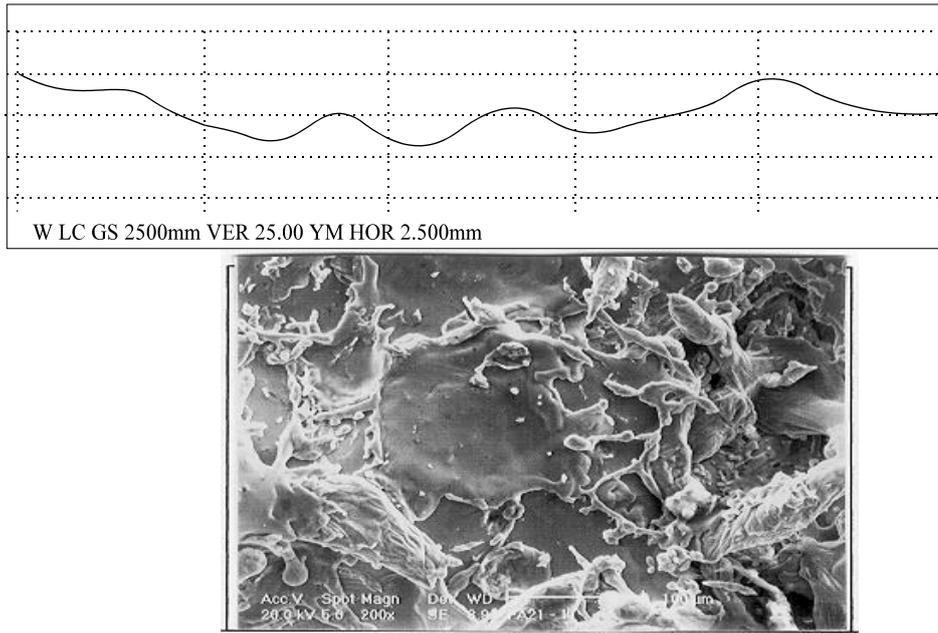


Figura 36. Superfície camada de Al (ASP) e curva equivalente da rugosidade Ry.

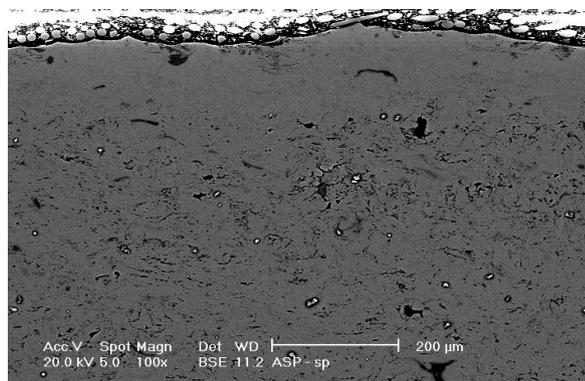


Figura 37. Microestrutura do efeito do “shot peening” sobre cp. aluminizado por AT ASP

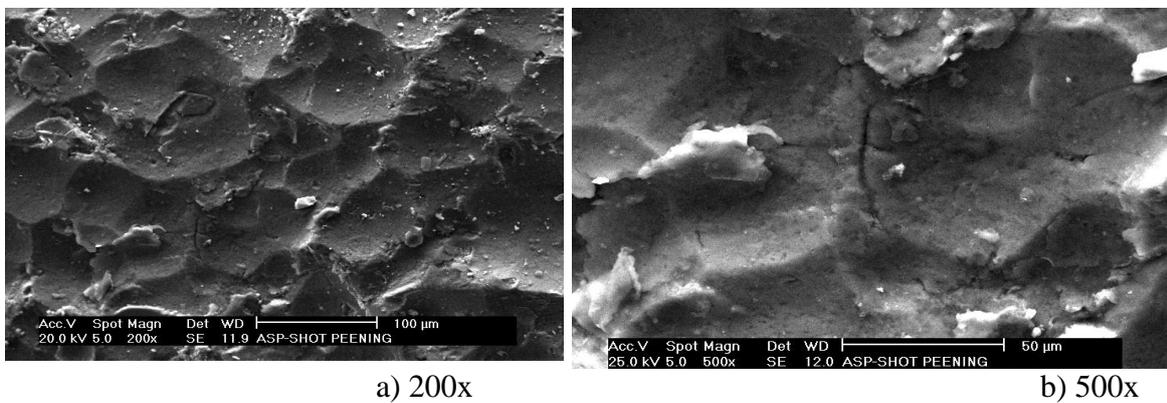


Figura 38. Estrutura da superfície da camada de Al após “shot peening”, AT ASP

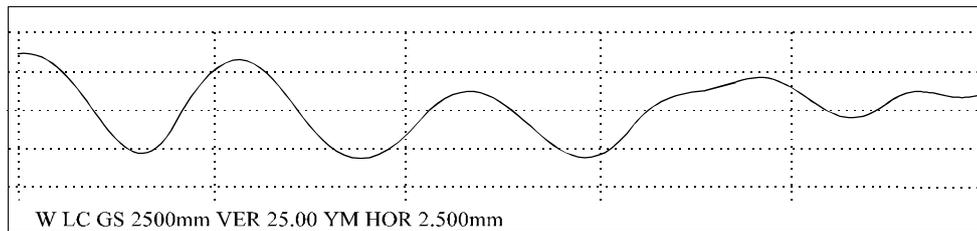
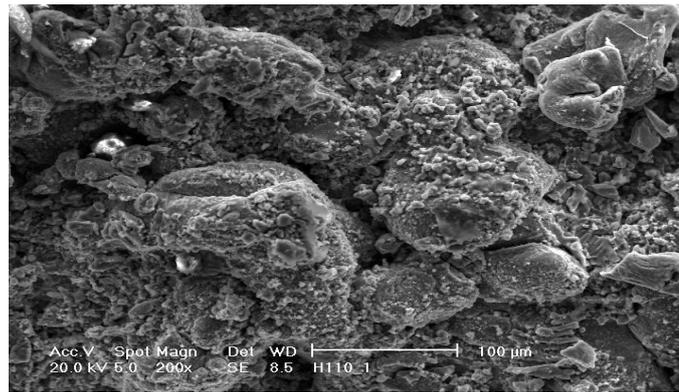
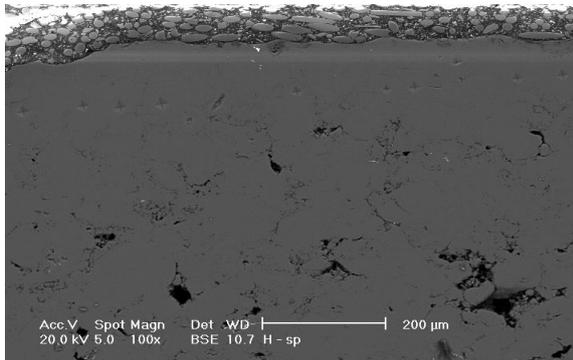
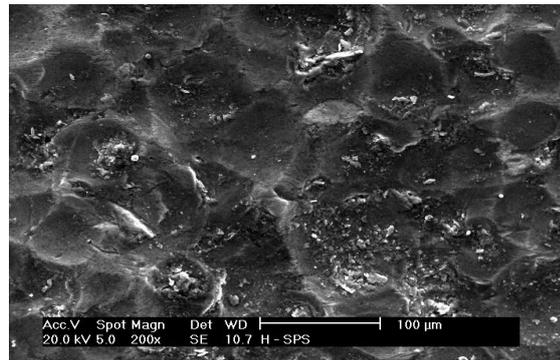


Figura 39. Estrutura da superfície aluminizada pelo processo HVOF e curva equivalente da rugosidade da camada de alumínio.



a) 100x



b) 200x

Figura 40. Microestrutura do efeito do “shot peening” (a) vista corte transversal (b) vista sobre cp. aluminizado pelo processo HVOF

Os resultados permitem concluir que o tratamento por shot peening é benéfico, produz endurecimento, compactação e diminuição da rugosidade superficial da camada. A compactação superficial da camada de alumínio permitiu reduzir a porosidade superficial e melhorar a coesão da camada.

4.3 MICRO TRINCAS

Micro trincas somente são aceitáveis somente em revestimentos cerâmicos e se localizam perpendicularmente as lamelas depositadas fazendo com que o material aumente sua capacidade de deformação e a resistência a fadiga. São formadas devido a tensões produzidas pela restrição a contração térmica de lamelas vizinhas, durante a solidificação. E isto normalmente não ocorre em materiais metálicos por que eles apresentam a característica de escoar plasticamente acomodando as deformações térmicas.

Para alguns autores a presença de um certo grau de porosidade e micro trincas são benéficos, pois inibem o crescimento e propagação de trincas maiores nos revestimentos, (LIMA E TREVISAN, 2002).

4.4 ADERÊNCIA

A aderência é um requisito fundamental para um bom revestimento, pois de nada adianta ter um revestimento de boa qualidade, com espessura de camada adequada, livre de porosidade e não se ter aderência no substrato. Então da aderência entre a camada e o substrato e da coesão das partículas depositadas que depende a resistência mecânica de um revestimento. As lamelas do revestimento ancoram-se mecanicamente à rugosidade da superfície do substrato devido a solidificação das partículas impondo uma força de contração, conforme pode se ver na Figura 41.

A análise da aderência do revestimento normalmente considera três mecanismos fundamentais, de acordo com a natureza das forças atuantes: ancoramento mecânico, químico-metalúrgico e físico e a aderência é uma combinação destes mecanismos, que podem atuar junto ou isoladamente. E no momento do impacto das partículas, quando elas são aquecidas e aceleradas contra o substrato fazendo com que se achatem numa forma lenticular, resfriando-se rapidamente e ancorando-se mecanicamente nas irregularidades da superfície.

A existência de aderência químico-metalúrgica pode ocorrer devido a microssoldagem podendo haver fusão localizada e difusão atômica com formação de soluções sólidas, mas tudo isto irá depender do material se metálico ou cerâmico e do calor transferido pela partícula ao substrato.

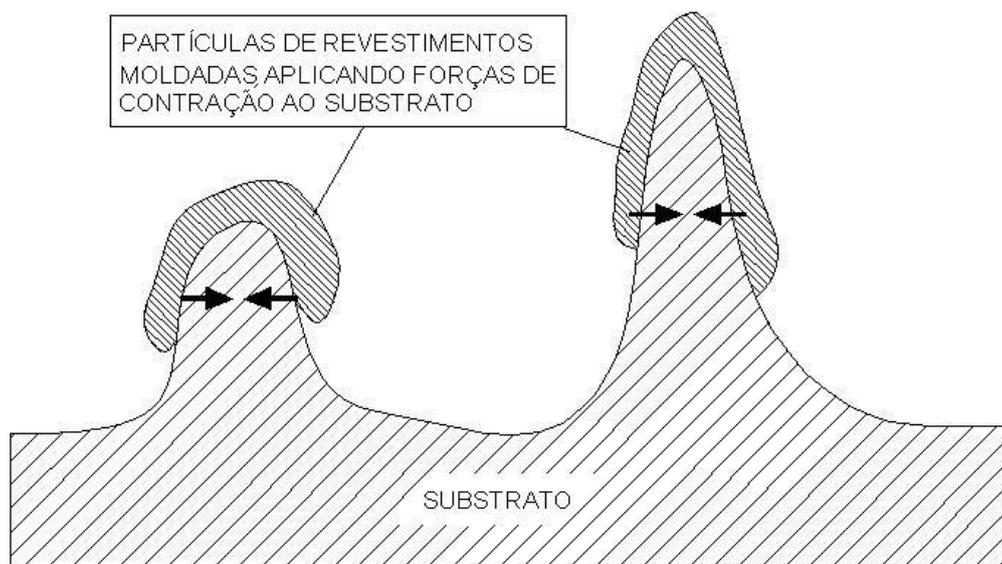


Figura 41 – Esquema de ancoragem mecânica das panquecas na superfície rugosa do substrato.

A microssoldagem ou também conhecida como zonas ativas são regiões de contato entre as lamelas e podem ser, normalmente, de 20 a 30% da área total da lamela, (LIMA E TREVISAN, 2002).

A interação física, considerado um mecanismo secundário, são ligações fracas entre os átomos das lamelas e o substrato, que contribuem com para a atração inter atômica do material, chamada de forças de Van der Walls, no qual o componente de ligação entre as moléculas mais importantes pode ser atribuídos as interações entre dipolos elétricos.

Outra interação conhecida como epitaxia que é quando a composição do substrato é similar à composição do material aspergido, (PAWLOWSKI, 2008). Neste caso, o substrato é molhado pela partícula líquida, e quando o contato é perfeito, os grãos parcialmente fundidos do substrato atuarão como substrato ideal para a nucleação e crescimento da lamela sólida.

De forma geral, quanto maior for à área de contato, zona ativa, entre as partículas aspergidas, maior será a resistência adesiva e coesiva de um revestimento e para aumentar esta região de contato de óxido e/ou pela introdução de elementos desoxidantes no material a ser aspergido. E para diminuição do teor de óxidos é aplicar o revestimento sem a utilização de oxigênio e para isto se tem os processos de AT como, CAPS, VPS ou LPPS.

4.5 MICROESTRUTURA

Assim como em outros materiais de engenharia, muitas das propriedades dos revestimentos dependem de sua microestrutura. Então para o entendimento das propriedades dos revestimentos é necessário interpretar como sua microestrutura é formada, (CORTÉS, 1998). A microestrutura dos revestimentos aspergidos e suas propriedades dependem muito dos fenômenos que ocorrem com as partículas durante seu trajeto até o substrato. Na Figura 42 pode se observar as características microestruturais típicas de camadas de alumínio depositadas pelos processos FS e ASP. Estes revestimentos mantêm sua integridade pelo contato interlamelar das panquecas, sobrepostas e intertravadas apresentando poros e camadas de óxidos de alumínio.

4.5.1 Morfologia e Solidificação

A solidificação de uma partícula é iniciada quando há o contato entre ela e o substrato ou outra partícula já depositada. As gotas aspergidas se achatam e solidificam-se apresentando um fluxo de calor na direção da partícula para o substrato mesmo este tendo pré-aquecimento. Os grãos são formados na interface do substrato por ser uma região de menor temperatura e avança em sentido contrário ao fluxo de calor. E quanto maior for a zona ativa, área de contato interlamelar, mais rápido o resfriamento procede.

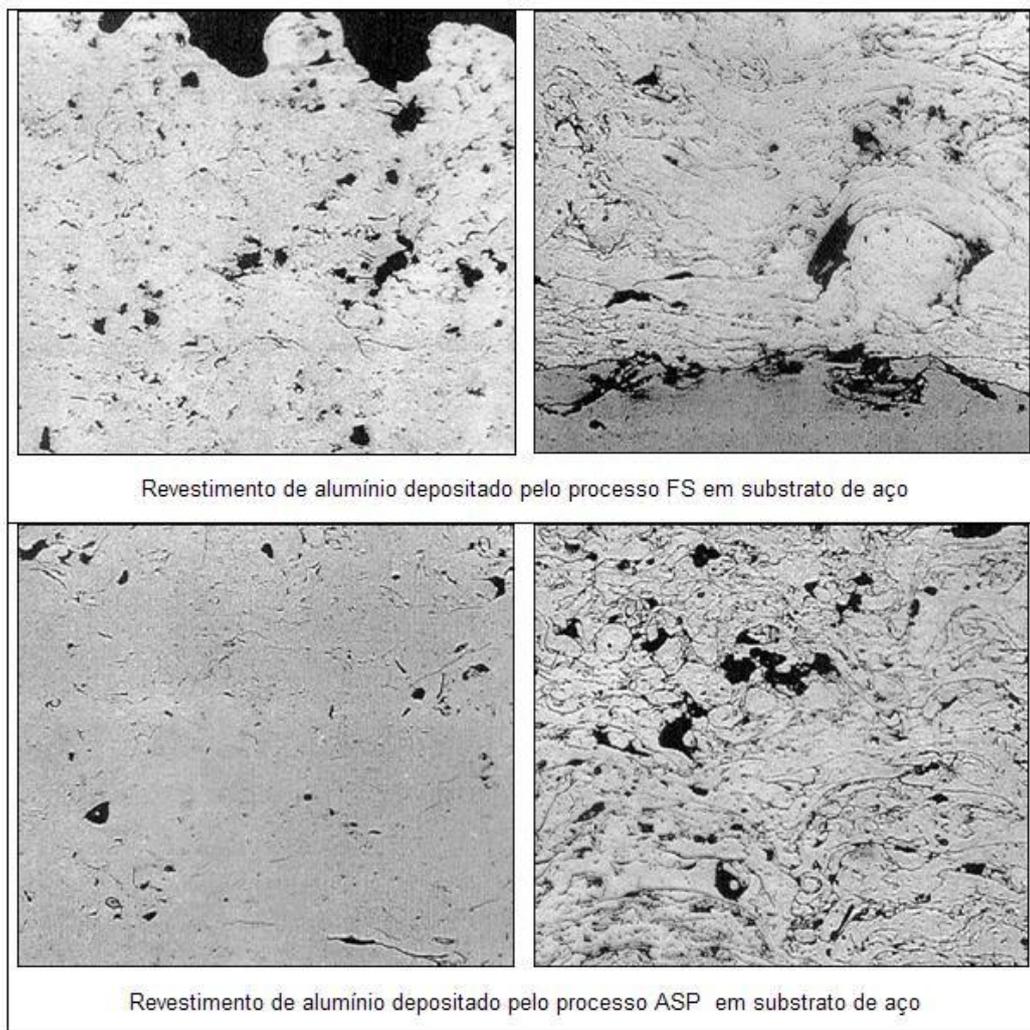


Figura 42 – Morfologia de camadas de alumínio depositado por diferentes processos de AT, 200x, ataque químico: 0.5-1% de HF, (CORTÉS, 1998).

Durante o encontro das gotículas pode haver ou não uma micro-soldagem por difusão no momento do impacto como é visto nas Figuras 43 e 44.

O mecanismo que ocorre no impacto envolve a deformação da gotícula com simultânea solidificação e interação térmica com o substrato num espaço muito pequeno e em um intervalo de tempo também muito pequeno.

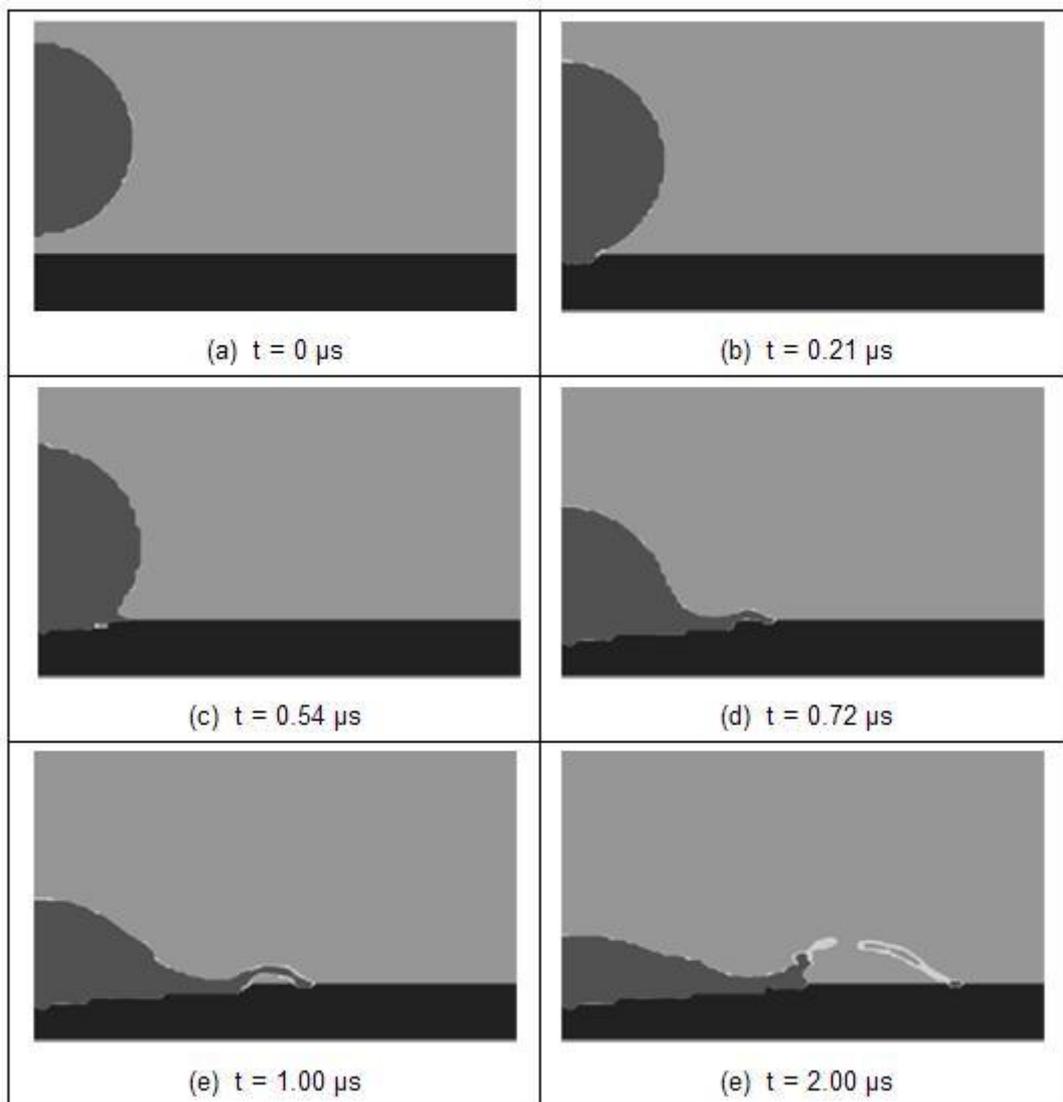


Figura 43 – Gotícula de molibdênio lançada com velocidade de 100 m/s fundindo-se no substrato de aço, adaptado de (ZHANG, 2001).

Na Figura 44 a gotícula, com tamanho de 100 μm , de molibdênio funde-se no substrato e também se deforma, projeta alguns salpicos e solidifica-se. Na Figura 45 a solidificação é mais acentuada não impedindo de acontecer a deformação da gota e como a solidificação é muito rápida não houve a fusão com o substrato, mas também foram lançados salpicos.

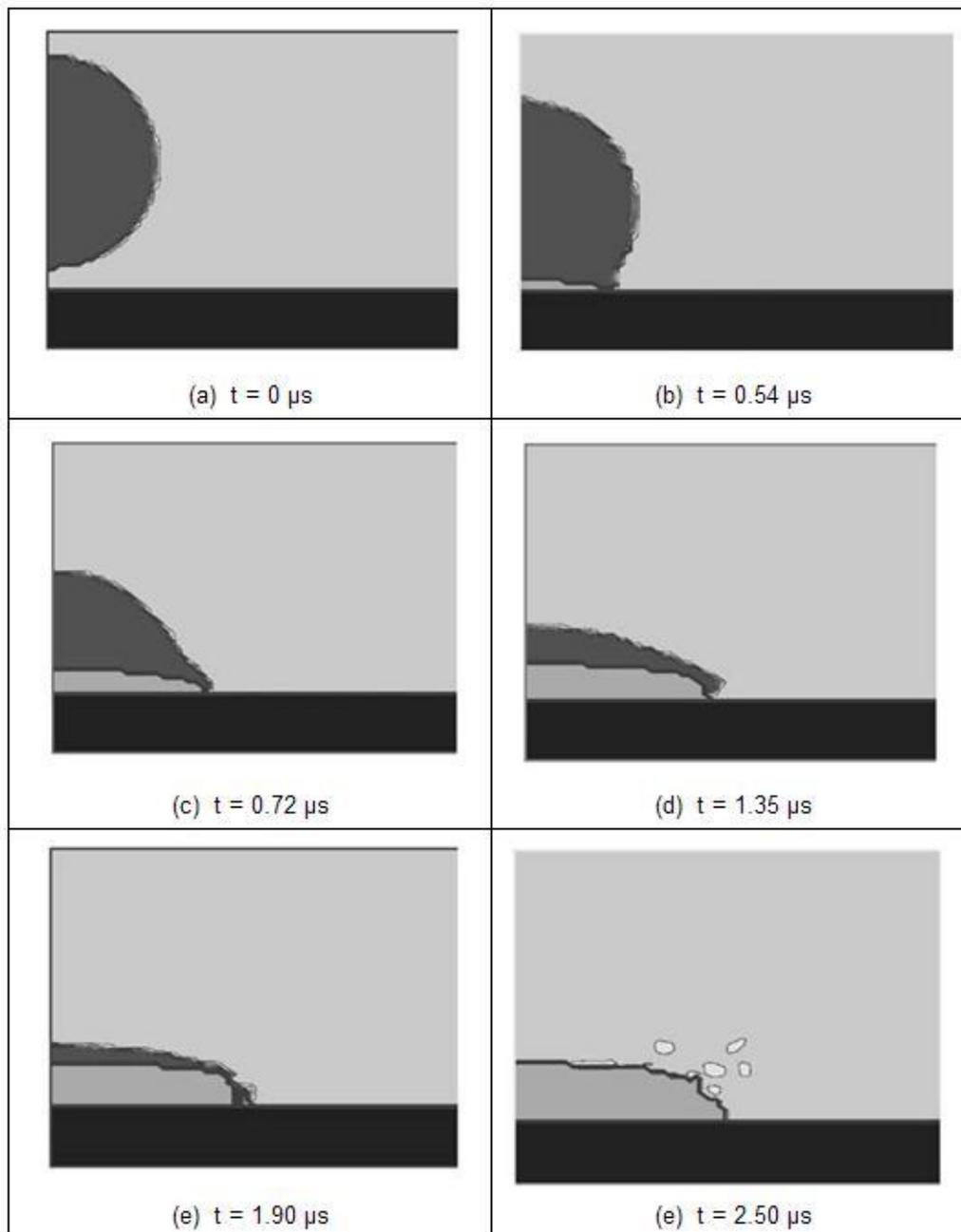


Figura 44 - Gotícula de molibdênio lançada com velocidade de 100 m/s solidificando e se deformando sem fundir no substrato de aço, adaptado de (ZHANG, 2001).

O espalhamento e o resfriamento das gotículas dependem de seu tamanho, da velocidade (Figura 45) e do estado das partículas antes do impacto, características do substrato, como, material, rugosidade e temperatura (Figura 46), características do processo, como, velocidade do fluxo, temperatura e pressão do gás de arraste. E estes parâmetros muitas vezes estão inter-relacionados.

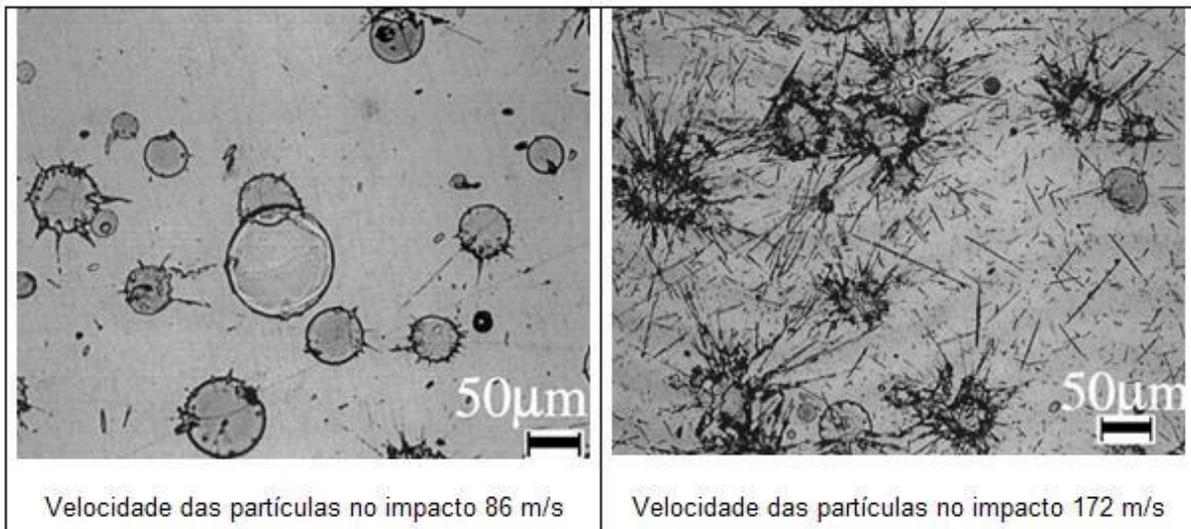
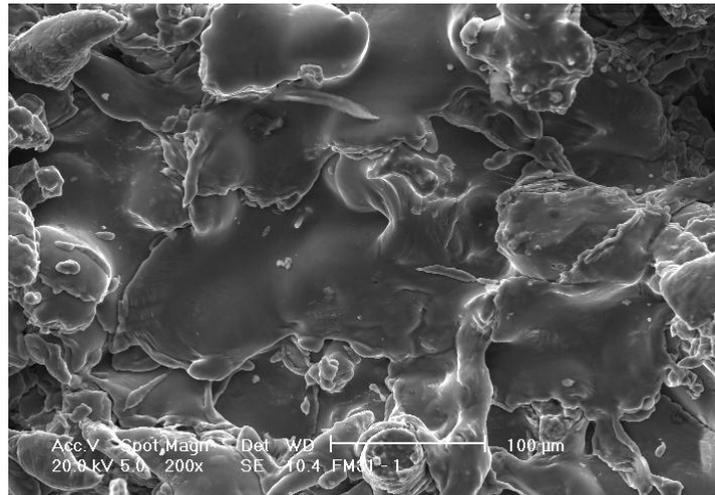
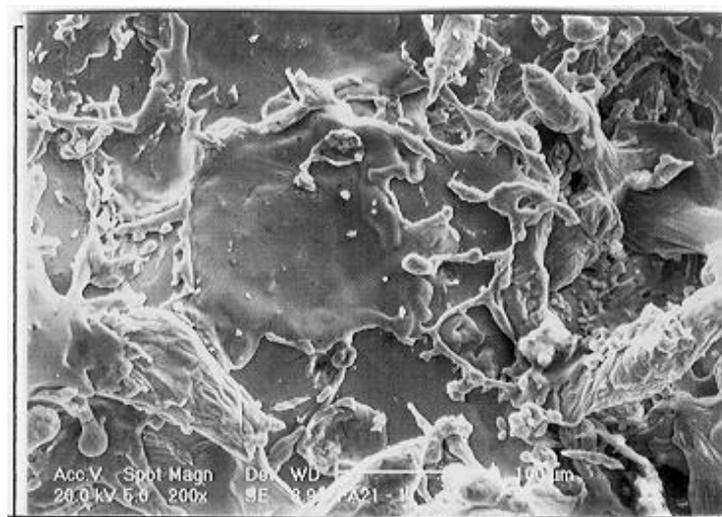


Figura 45 – Efeitos da velocidade das partículas na morfologia da panqueca aspergidas num substrato polido de aço inoxidável 304 de (ZHANG, 2001).

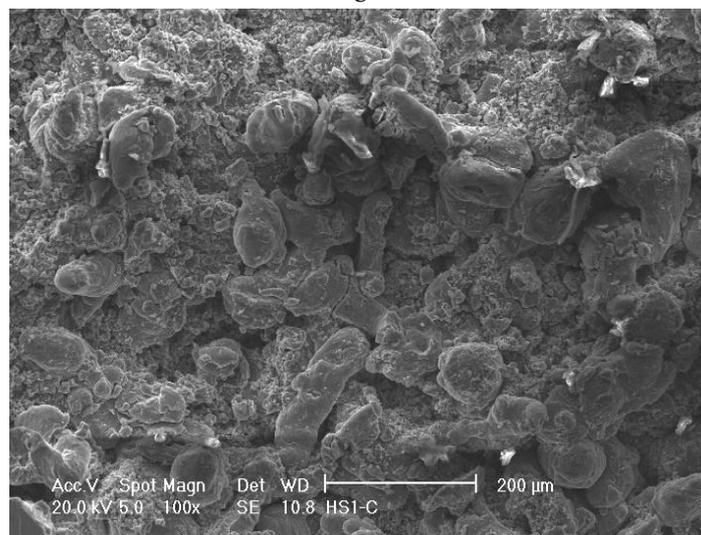
Observa-se na Figura 46 que a maior velocidade das partículas fazem aumentar os salpicos e também gera uma fragmentação das gotículas o que não se observa na velocidade de impacto menor, em que as partículas mantêm uma forma circular.



a



b



c

Figura 46. Microestrutura da superfície de camadas de alumínio depositadas pelos processos a) chama FS, b) arco elétrico e c) HVOF.

Nas figura 47 e 48 observa-se vista de corte transversal de dois diferentes tipos de revestimentos.

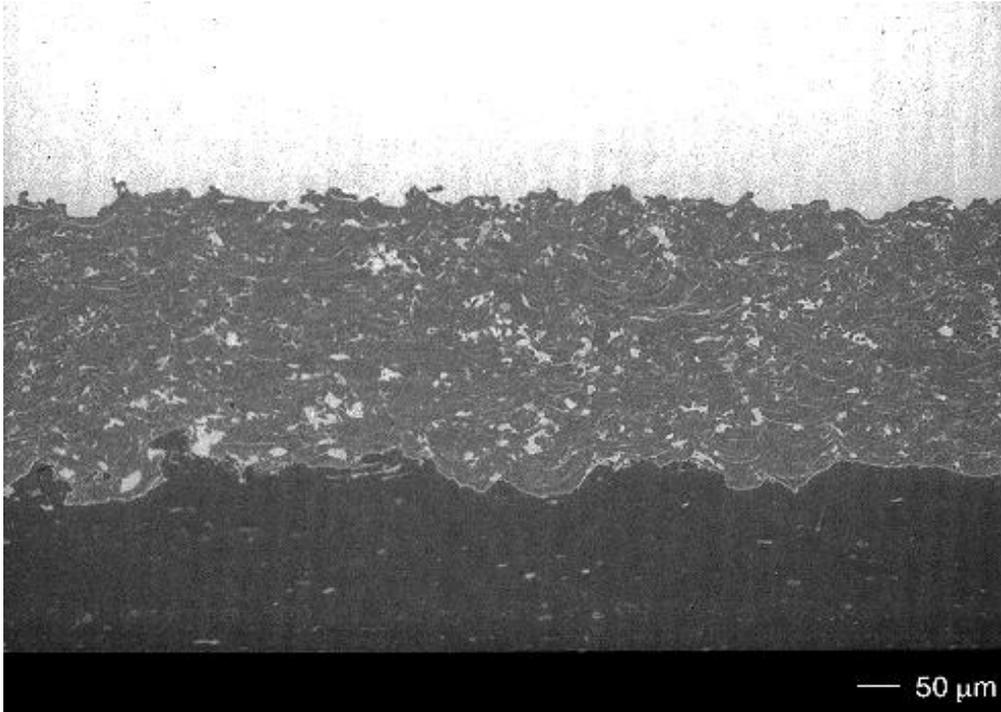


Figura 47. Microestrutura de camada de AlSi depositada pelo processo Plasma Pistola F210.

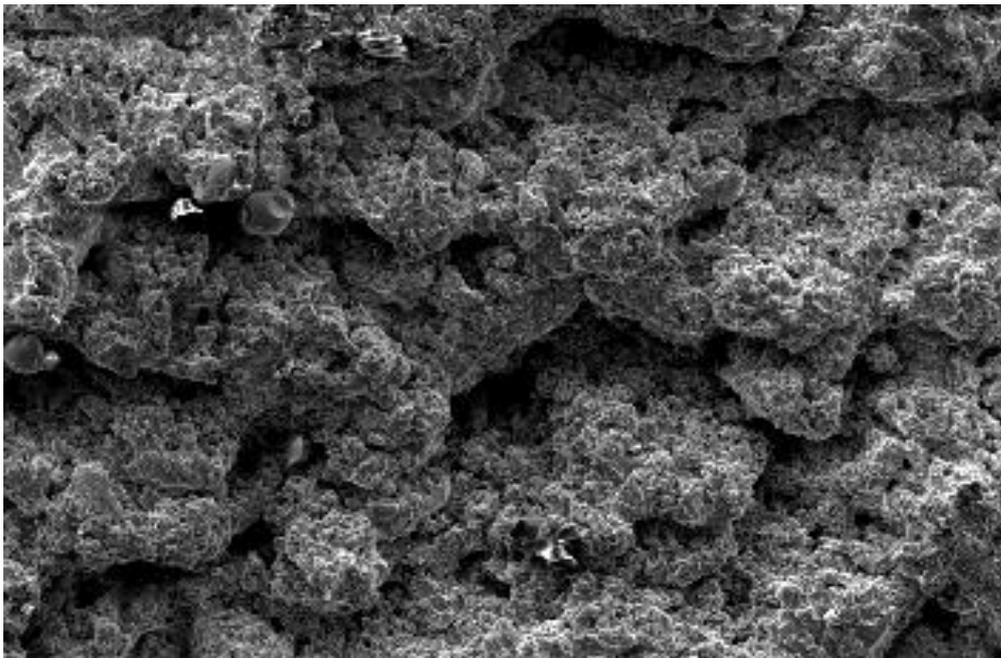


Figura 48. Microestrutura da superfície de revestimento de carbeto de cromo depositado pelo processo HVOF Pistola DJ Híbrida METCO.

4.6 FORMAÇÃO DE ÓXIDOS

A formação de óxidos, nos processos de AT, está relacionado com a atmosfera pela qual as partículas transferidas e depositadas e estas partículas estão fundidas ou superaquecidas. Então como as partículas estão quentes em contato com o ar ambiente faz com que as partículas sejam cobertas por filmes de óxidos.

Inclusões de óxidos em revestimento metálicos são diferenciadas por apresentar fases escuras e alongadas que podem ser observadas na seção transversal do revestimento, paralelas ao substrato. E estas inclusões podem aumentar a dureza do revestimento tornando quebradiço.

A porcentagem do teor de óxido vai influenciar na qualidade do revestimento, podendo diminuir a sua força coesiva do revestimento no substrato e interlamelar.

E para minimizar as inclusões de óxidos nos revestimentos (BERNDT e BERNECKI, 2004) elencam alguns parâmetros.

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

E conforme (ZIMMERMANN e KREYE, 1997) a formação de óxidos está relacionada com a atmosfera pela qual são transferidas e depositadas as partículas fundidas ou superaquecidas no bico das pistolas de cada processo de AT.

Rodriguez [3] dividiu os processos de oxidação no processo a arco elétrico em quatro mecanismos, ou zonas de oxidação, como é mostrado na Figura 21:

A Figura 49 mostra as principais fontes de oxidação.

- Mecanismo 1 – fonte de calor (arco elétrico), partículas que têm o primeiro e mais relevante contato com ambiente oxidativo. Exclusivo para o processo ASP.
- Mecanismo 2 – considerando a oxidação entre a partícula e o gás de transporte (geralmente ar comprimido). Há a reação entre a partícula e oxigênio ou elementos oxidantes presentes nos gases expelidos pela pistola. Ambiente que envolve a zona de transferência.
- Mecanismo 3 – o ar do meio ambiente que envolve a zona de transferência das partículas devido ao fluxo turbulento dos gases.
- Mecanismo 4 - partículas e/ou camadas já ancoradas ao substrato e que ficam expostas ao ar do meio ambiente após o deslocamento da partícula.

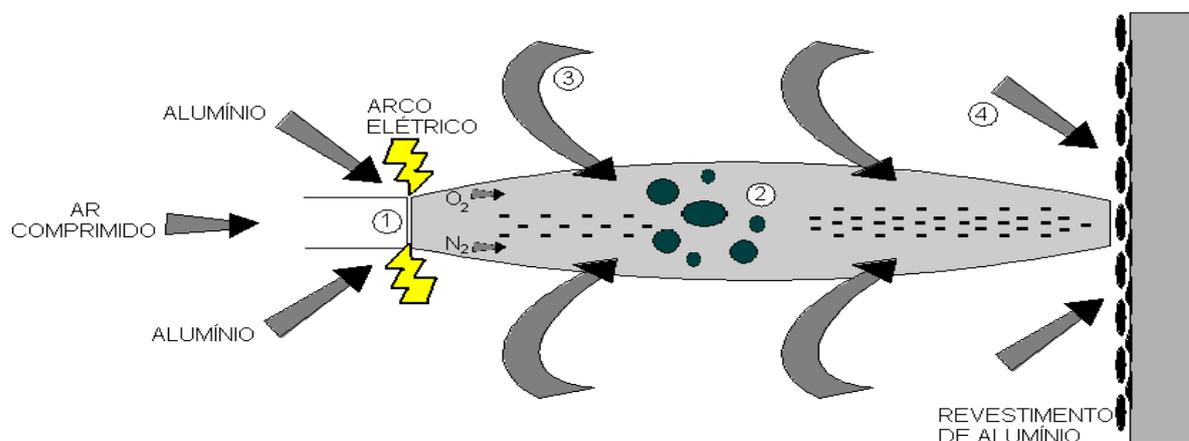


Figura 49 – Forma esquemática das fontes de oxidação em um jato durante a AT, (RODRIGUEZ).

E através da análise dessas regiões, podemos sugerir a análise e inclusão de um quarto mecanismo de oxidação, ou seja, a oxidação que deve ocorrer na fonte de calor. E em processos que utilizam a chama e arco elétrico como fonte de calor para gerar o aquecimento das partículas e a presença de ar atmosférico cria condições favoráveis à oxidação, (RODRIGUEZ, et al, 2002).

5 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DO REVESTIMENTO

Para comprovar a qualidade do revestimento uma série de testes pode ser realizada com a finalidade de avaliar as suas propriedades, pois o bom desempenho será conseguido se o controle das diversas etapas do processo for seguido.

O avanço de técnicas de aplicação, através do emprego de tecnologias de controle de processo, permite que o revestimento tenha cada vez mais qualidade. E isto aliado a escolha correta dos materiais, entendendo o que eles podem oferecer, impõem ao processo de AT uma maior confiabilidade e repetibilidade.

5.1 ESPESSURA

A condição econômica para aplicação do revestimento deve ser bastante considerada na determinação de sua espessura, pois esta deve flutuar entre a espessura mínima que forneça o desempenho adequado e a espessura máxima que não inviabilize o processo.

Outro fator importante na escolha da espessura de revestimentos é a relação eletroquímica entre o revestimento e o substrato. Se o material a ser revestido é anódico em relação à base, a presença de poros não é fator primordial, já que a corrosão preferencial do depósito promove proteção catódica. Um revestimento com espessura da ordem de 70 μm ou menos, certamente apresentará permeabilidade, mas depósitos de alumínio, usados como proteção à corrosão, normalmente, são mais espessos. Revestimentos catódicos em relação à base, normalmente são aplicados com espessuras suficientes para eliminar poros interconectados ao substrato. Dessa forma, suas espessuras são geralmente excessivas, entre 250 a 500 μm , (CORTÉS, 1998).

A espessura mínima depende do tamanho das partículas do pó e do diâmetro se for alimentado com arame, considerando constante a velocidade de avanço da pistola e fluxo de material. Como o revestimento é constituído de camadas lamelares, a espessura total é obtida pelo número de demãos. Camadas mais densas são conseguidas reduzindo a velocidade e aumentando o fluxo de material.

A medição da espessura do revestimento quando o material do revestimento não for magnético aplicado num substrato de aço utiliza-se a aparelhos de indução magnética possuindo

uma grande vantagem de ser uma técnica de ensaio não destrutivo. Mas pode ser realizado em laboratório análise metalográfica através de um corte transversal que fornece boa precisão.

5.2 TESTES PARA MEDIÇÃO DE ADERÊNCIA

A aderência é medida como a força necessária para separar o revestimento do substrato, e esta idéia reforça a importância da preparação do substrato na adesão do revestimento. E a determinação da aderência pode ser realizada por um conjunto de testes, não obstante são todos destrutivos.

5.2.1 Teste de Tração

O teste de tração é um dos mais utilizados por ser normalizado e relativamente simples de executar, permitindo a avaliação dos parâmetros de aspersão e adequação da preparação da superfície. O ensaio de tração consiste na aplicação de uma força trativa crescente e perpendicular ao plano da interface revestimento substrato.

Para a aplicação da força trativa é necessário a utilização de adesivo apropriado entre a face revestida do corpo-de-prova, CP, e a face de um corpo extrator. Para que o ensaio tenha validade, a resistência do adesivo deve ser no mínimo igual à aderência entre o revestimento e o substrato que se pretende medir.

Para a análise quantitativa da adesão do revestimento o teste proposto pela norma ASTM-C633-79 requer CP cilíndrico, utilizado como substrato, diâmetro 25 mm e também com 25 mm seu comprimento. Então o corpo de prova revestido é unido através de um adesivo à base de epóxi com uma contraparte, de mesmas dimensões, feita em aço 1020. Após a cura do adesivo e o conjunto montado segundo o esquema da Figura 50 é iniciado o ensaio de tração, no qual o revestimento deve ter espessura de 380 a 500 μm , esta medida é para evitar que haja a infiltração do adesivo no revestimento chegando até o substrato, influenciando no resultado final.

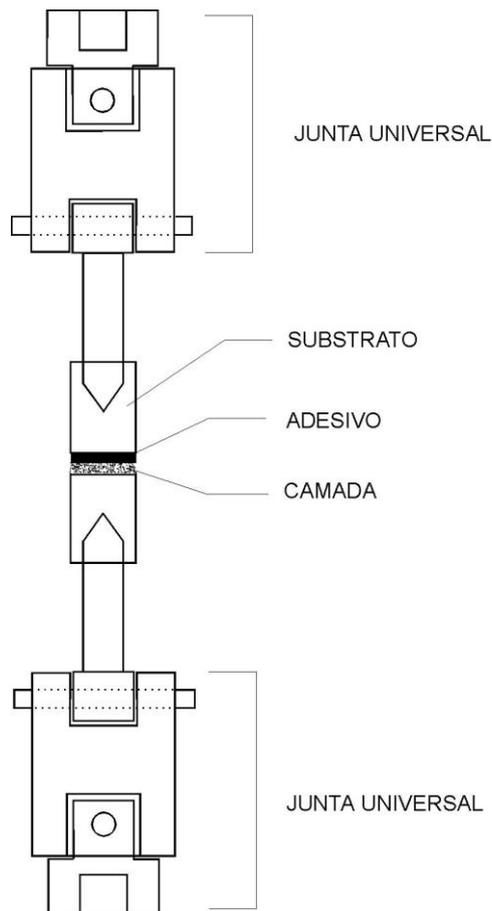


Figura 50 – Dispositivo para ensaio de tração de acordo com a norma ASTM-C633.

Nos testes de aderência por tração podem ocorrer três tipos de falha, conforme a Figura 51 e são classificados em função da região da ruptura.

- Adesiva: a ruptura ocorre na interface revestimento / substrato (falha devido à perda de aderência).
- Coesiva: a ruptura ocorre entre as camadas do revestimento (falha devida à falta de coesão);
- No adesivo: a ruptura ocorre em qualquer posição no interior do adesivo ou nas suas interfaces. Neste caso, o teste deve ser considerado inválido, pois somente será possível saber que a aderência do revestimento é superior ao valor obtido.

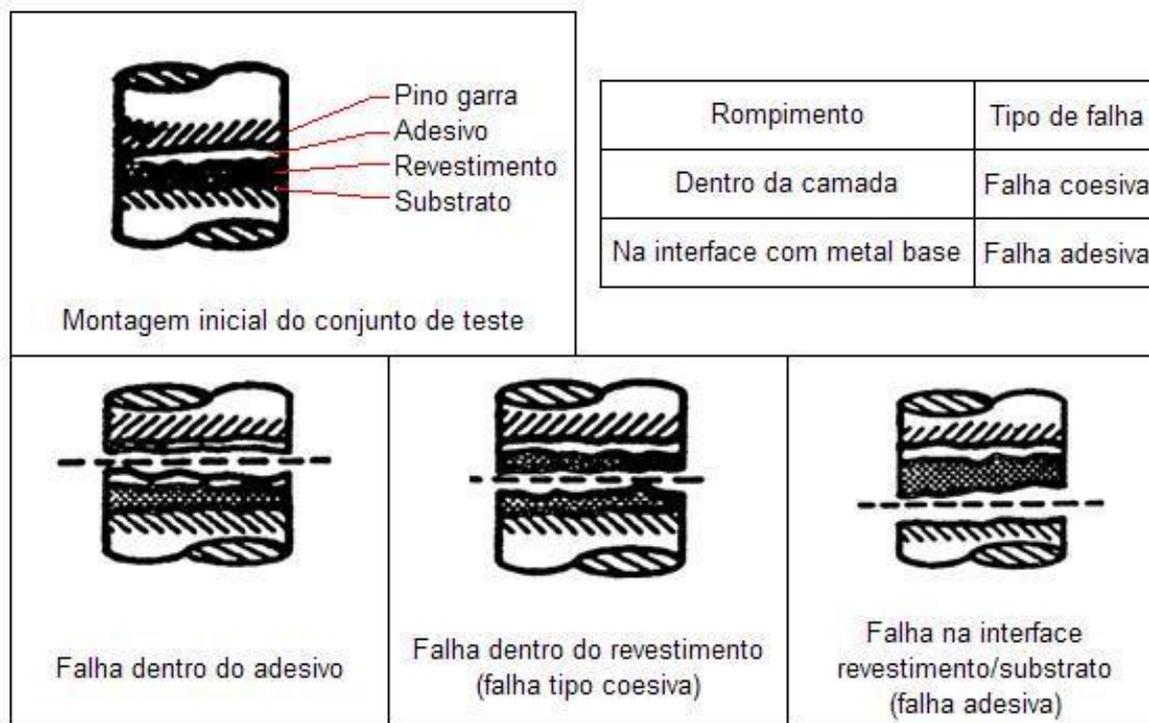


Figura 51 – Tipos de fratura resultantes do teste de tração, falha adesiva e falha no metal base, adaptado da norma PETROBRÁS N-2568.

E a norma PETROBRÁS N-2568 traz seus critérios de aceitação:

- 10.3 MPa mínimo e média de 13.8 MPa no mínimo para revestimentos de alumínio.
- 5.52 MPa mínimo e média de 6.90 MPa no mínimo para revestimentos de zinco.
- 10.3 MPa mínimo e média de 13.8 MPa no mínimo para revestimento de 85Zn15Al.

O exame de cada corpo de prova após fratura deve ser observado para se identificar a causa da falha. Nenhum ensaio pode ter uma ruptura do tipo falha 100% adesiva ou 100% no metal de base.

O ensaio para verificar a adesão em campo por tracionamento deve ser executado com equipamentos portáteis, seguindo o especificado pela norma ASTM D 4541.

5.2.2 Teste de Dobramento

O teste de dobramento também é destrutivo no qual deve ser preparado amostras as quais devem ser de mesmo material do substrato, possuir as mesmas características superficiais e o revestimento ser aplicado com os mesmos parâmetros. Este ensaio irá fornecer um comparativo da ductibilidade da camada de revestimento e a aderência.

A norma MIL-STD-2138A traz uma metodologia para o ensaio. E o resultado é avaliado através do aspecto visual, do corpo de prova, conforme o esquema da Figura 52 e do equipamento de dobramento na Figura 53. E os critérios de aceitação estão na TABELA 10.

E conforme a norma PETROBRÁS N-2568 o teste de dobramento deve der executado dobrando-se cinco corpos de prova 180° em um mandril de 13 mm de raio. O revestimento deve estar na parte tensionada. Os corpos de prova a serem usados no teste de dobramento (75 x 50 1,25 mm) são os mesmos usados para o exame visual devendo estar o revestimento numa suas faces mais largas (com espessura de revestimento variando de 175 - 250 µm).

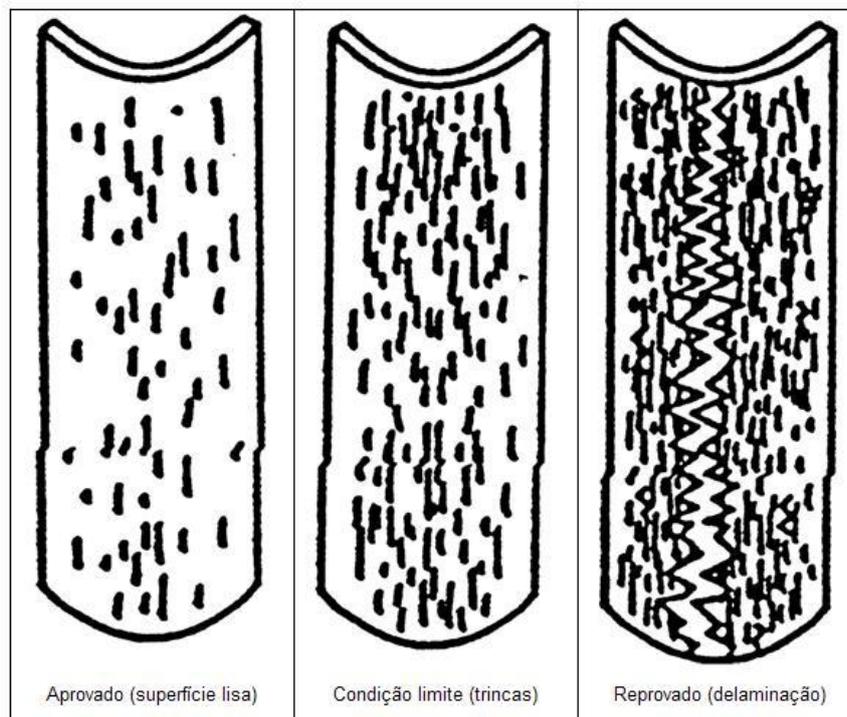


Figura 52 – Aspecto visual da superfície dos revestimentos submetidos ao ensaio de dobramento, norma PETROBRÁS N-2568.

Tabela 10 – Critérios de avaliação dos ensaios de dobramento para aprovação das camadas, norma PETROBRÁS N-2568.

Condição	Aparência da superfície
Aprovado	Sem micro trincas, ou micro trincas superfícies
Condição limite	Contém micro trincas, sem desgarramento ou delaminação da camada
Reprovado	Contém trincas e fendas com desgarramento e delaminação da camada



Figura 53. Equipamento de ensaio de dobramento (LABATS).

5.3 MEDIÇÃO DE POROSIDADE

A presença de porosidade na superfície é detectada através de uma análise metalográfica de corpos de prova em microscópio ótico, auxiliado por um analisador de imagens que permite quantificar a área da camada examinada, porcentagem de poros, área média de poros e número de poros.

E a porosidade passante pode ser confirmada em revestimentos de alumínio, com 250 μm , através do teste ferrocianeto de potássio. E para este procedimento utiliza-se uma solução de

que contém de 1 a 2 % de NaCl e entre 0.1 a 0.5 % de ferrocianeto de potássio, então esta solução é colocada em gotículas sobre a superfície revestida e visualmente detecta-se a reação ficando azul se a porosidade for passante.

E em sua tese de doutorado (MENEZES, 2007) expõem os possíveis tipos de porosidade que podem surgir em um revestimento aspergido termicamente, a Figura 54 exemplifica cada um destes tipos de porosidade.

- Tipo 1: porosidade formada entre as lamelas e causada pelo empilhamento de partículas separadas. Este tipo de porosidade pode estar relacionada ao tamanho da partícula aspergida e a característica do material de alimentação.
- Tipo 2: porosidade formada por bolsas de gás preso causadas pela turbulência do fluxo de gás durante o processo de aspersão.
- Tipo 3: porosidade manifestada na forma de bolhas de gás causada pela dissolução do gás no metal fundido que se desenvolveram com o resfriamento do metal.
- Tipo 4: porosidade causada pela desintegração de partículas sólidas após o impacto, durante o processo de deposição.
- Tipo 5: porosidade ocasionada pela condensação de partículas parcialmente evaporadas e que foram identificadas como partículas contendo resíduos de pó.
- Tipo 6: porosidade resultante de contração de solidificação.
- Tipo 7: porosidade que resulta em micro-trincas, independente de sua origem de formação.

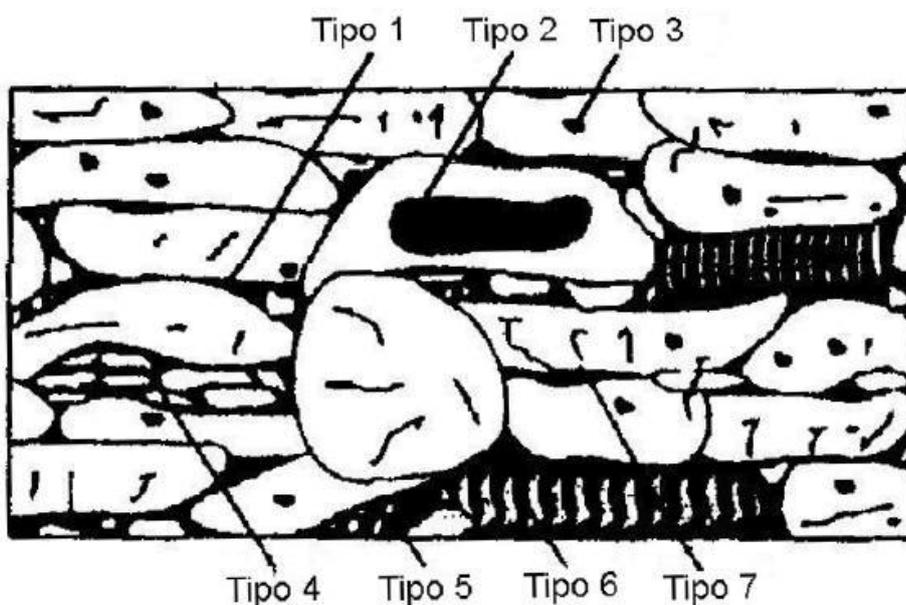


Figura 54 – Possíveis tipos de porosidade existentes em um revestimento aplicado por AT, (MENEZES, 2007).

5.4 MEDIÇÃO DE DUREZA

A dureza não é uma propriedade elementar do material, mas depende da combinação de diferentes propriedades físicas. Há diversos modos de mensurar a dureza e em muitos casos eles não podem ser comparados entre si, pois chegam a um resultado comparando diferentes propriedades físicas. A dureza da camada de um revestimento aspergido tem significativa importância na prática, pois pode se relacionar seu valor com propriedades como desgaste, fadiga e corrosão

Para a medição de dureza de revestimento o método de indentação é o mais utilizado e tem como princípio a penetração de um penetrador padrão na superfície com uma carga conhecida. E a dureza do revestimento é medida por meio da marca deixada na superfície, auxiliado por Tabelas.

Em um revestimento termicamente aspergido que tem como característica uma estrutura lamelar tem uma natureza heterogênea, isto é, com variações de espessura, presença de óxidos e poros o que resulta em diferentes valores de dureza dentro de um revestimento. Então é necessário que seja feita uma distinção dos ensaios em microdureza e macrodureza.

5.4.1 Medição de Microdureza

Para o ensaio de microdureza se faz a preparação da superfície como se fosse para um ensaio metalográfico, o teste mais aplicado utiliza o penetrador Vickers ou Knoop em seção longitudinal do revestimento, mas também pode ser realizado na seção transversal. Os revestimentos apresentam maior dureza na direção perpendicular a sua superfície, ou seja, seção transversal.

O indentador tem a forma de uma pirâmide, confeccionado de diamante e as dimensões variam de acordo com a carga aplicada e o procedimento para realizar esta medida segue a norma ASTM E-384-89.

Para o substrato não interferir no resultado do ensaio de microdureza a espessura dos revestimentos aspergidos deve ser considerada. A camada deve ser no mínimo 10 vezes mais espessa que a profundidade de indentação. Então a micro dureza Knoop traz uma vantagem sobre isto, pois para a mesma dureza e precisão ela tem uma profundidade menor, correspondendo a 25 % da profundidade para a medição de microdureza Vickers.

5.4.2 Medição de Macro dureza

Conforme (LIMA E TREVISAN, 2002) avaliar a macro dureza é um modo conveniente de aferir a repetibilidade de um revestimento característico, mas não deve ser usado para avaliar o desempenho deste revestimento e nem para comparar entre diferentes revestimentos. Neste método a espessura do revestimento também deve ser considerada. E os valores obtidos nos ensaios de macro dureza não são uma identificação verdadeira da qualidade do revestimento para um dado material.

Para os revestimentos obtidos por AT, o teste de dureza Rockwell é o mais indicado, a TABELA 11 traz um referencial de espessuras mínimas para as diferentes escalas Rockwell, conforme procedimentos da norma ASTM E 18-94.

Tabela 11 – Espessura mínima para determinação da macro dureza Rockwell.

Escala Rockwell	Espessura (mm)	Escala Rockwell	Espessura (mm)	Escala Rockwell	Espessura (mm)
15N	0.40	A	1.00	D	1.30
30N	0.64	B	1.60	15Y	1.80
45N	0.90	C	1.80	15W	1.80

5.4.3 Avaliação de Resistência a Corrosão dos Revestimentos

Para a avaliação da resistência a corrosão dos revestimentos depositados acontece com ensaios de corrosão em câmara de névoa salina e ensaios eletroquímicos como, por exemplo, determinação de potencial a circuito aberto, curvas de polarização anódica e catódica, polarização linear e espectroscopia de impedância eletroquímica são algumas das técnicas existentes.

No ensaio de corrosão por névoa salina a corrosão dos corpos de prova é acelerada, pois ficam em uma câmara, banhados por uma névoa salina, que tem a finalidade de simular uma atmosfera marinha e este procedimento estão estabelecidos nas normas ASTM B 117/90 e ASTM G1-88.

E quando o revestimento está exposto à ambientes marinhos é importante avaliar a taxa de corrosão, a Figura 55 mostra perda relativa de espessura do metal.

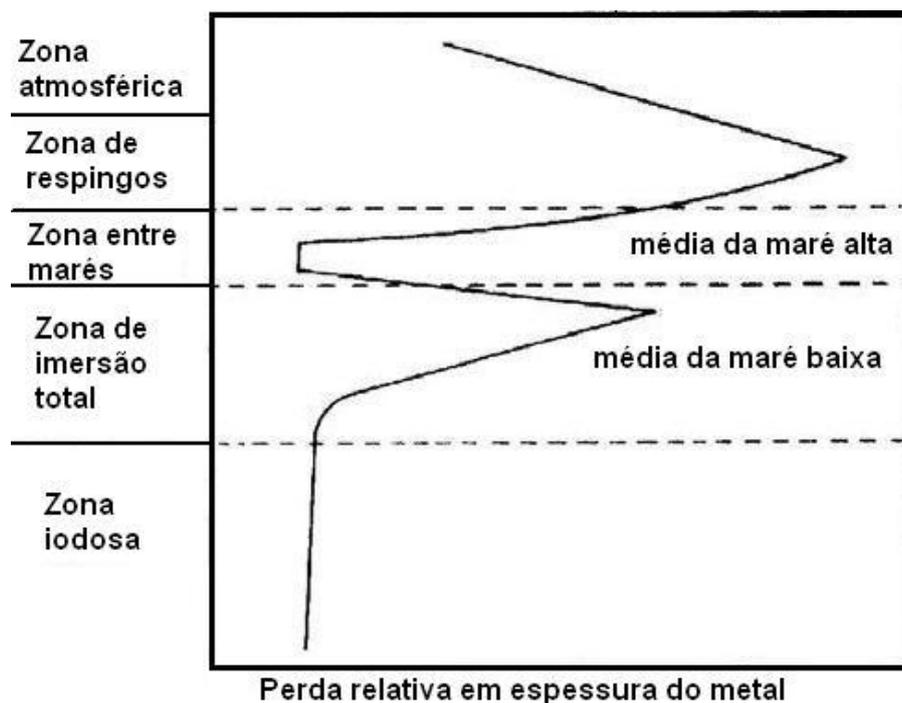


Figura 55 – Perfil de corrosão de estruturas de aço em água do mar, (RAMANATHAN, 1994).

6 ACABAMENTO DAS CAMADAS DEPOSITADAS

A necessidade de acabamento superficial depois da aspersão do revestimento irá depender muito da sua finalidade, ou seja, se o uso do revestimento foi para recuperar ou

beneficiar o componente mecânico, para que ele volte a desempenhar sua função. Um trabalho posterior de usinagem ou retificação será indispensável, pois a superfície aspergida deixa uma rugosidade muito grosseira. Entretanto se aplicação do revestimento foi para proteger contra corrosão não há exigência de acabamento superficial, somente uma selagem.

As camadas depositadas por AT podem ser acabadas de muitas maneiras., como por exemplo, lixamento, polimento, retificação feita em máquina de alta precisão ou a selagem. Os fatores que vão orientar a escolha do método de acabamento são:

- Tipo de material a ser acabado.
- Forma da peça.
- Grau de acabamento (rugosidade) e tolerância dimensionais.
- Tipo de equipamento disponível.
- Meio onde será exposta a camada depositada.
- Custo inerente aos processos.

Em geral, nas camadas depositadas por AT, o acabamento é tanto melhor quanto mais uniforme for o depósito e quanto menor for o tamanho das partículas componentes da camada.

Embora algumas técnicas de acabamento já estejam consolidadas, alguns cuidados devem ser tomados para garantir a integridade do revestimento, pois pode se causar arrancamento de partículas deixando porosidade superficial e trincamento devido a tensões térmicas.

6.1 USINAGEM

Como a estrutura da camada de revestimento obtida por AT é lamelar a remoção de material ocorre de forma particulada e granular. E esta estrutura lamelar e porosa, com partículas bem definidas e inclusões de óxidos, gera camadas de condutibilidade térmica mais baixa do que a dos materiais sob outras formas. E isto dificulta que o calor gerado pelo trabalho de usinagem seja dissipado.

Os materiais temperáveis, resistentes à abrasão e além de camadas de óxidos deixam o revestimento bem mais difícil de usinar.

6.1.1 TORNEAMENTO

A utilização de máquinas com alta rigidez, ferramentas de materiais mais duros e técnicas especiais permitem o torneamento de revestimentos aspergidos. As ferramentas mais utilizadas para usinagem de revestimentos são os carbonetos e a Figura 56 traz os ângulos recomendados para uma ferramenta de carboneto típico e uma de aço rápido.

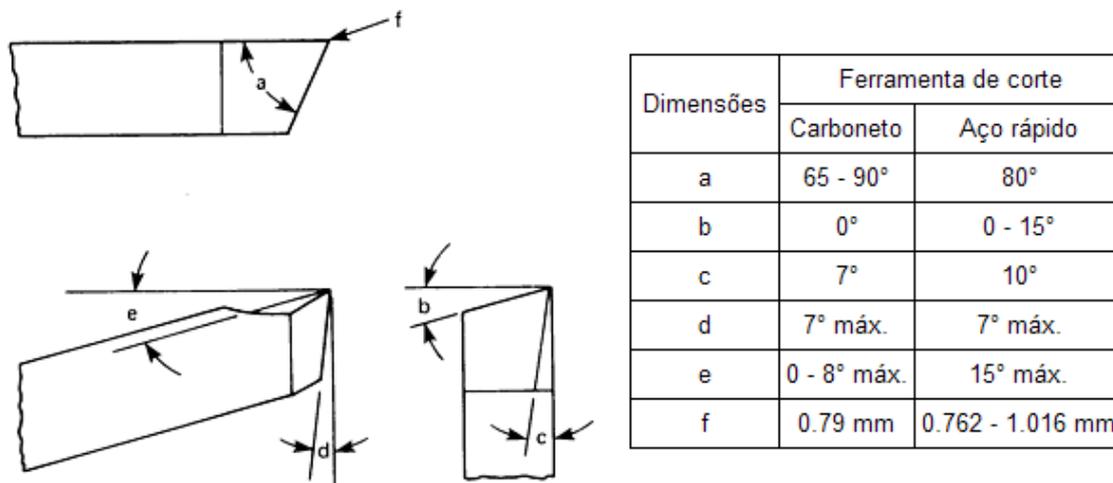


Figura 56 – Ângulo para ferramentas de torneamento, (ASM, 1994).

6.1.2 RETIFICAÇÃO

A retificação costuma ser um dos melhores processos para conseguir acabamento com baixa rugosidade superficial e alta precisão, mesmo em materiais de revestimento mais duros.

Para a retificação de materiais brutos a retificação já exige que este processo seja com uma considerável refrigeração para dissipação de calor, entretanto para revestimentos aspergidos que devido à estrutura e seus constituintes tem a dissipação de calor deficitária, a refrigeração deve ser abundante, para não haver um sobreaquecimento localizado.

6.2 SELAGEM

Os revestimentos aspergidos podem apresentar porosidade abaixo de 1%, mas seus valores mais comuns de porosidade estão entre 1 e 15%. E como em alguns casos é possível reduzir os níveis de porosidade, mas não eliminá-lo utiliza-se a selagem, que é um dos tratamentos realizados após a AT com a intenção de realizar uma vedação dos poros reduzindo a área exposta, minimizando a corrosão. Os selantes são classificados de acordo com a Tabela 12.

Tabela 12 – Lista de materiais selantes.

Não secáveis	Secáveis ao ar	Catalíticos
Ceras	Tintas, borracha colorada	Resina epóxi
Óleos	Fenólicos secáveis ao ar	Poliésteres
Graxas	Fenólicos epóxi	Poliuretanos
Recozidos (baking)	Vinis	Outros
Fenólicos recozidos	Poliésteres	Silicatos de sódio
Fenólicos epóxi	Resinas silicone	Etil silicatos
Resinas epóxi afinadas	Óleo de linhaça	Metacrilatos anaeróbicos
Poliésteres	Piches (coal tars)	
Poliamidas	Poliuretanos	

A utilização da selagem pode ser justificada pelos seguintes motivos:

- Aumentar a vida útil de revestimentos de alumínio e zinco resistentes à corrosão.
- Vedação dos poros em componentes hidráulicos sujeitos a variações intermitentes de pressão.
- Melhorar a usinabilidade das camadas
- Manter as constantes dielétricas de camadas de cerâmica.

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

6.3 TRATAMENTO EM MATERIAIS AUTOFLUXANTES

A fusão é um pós-tratamento de revestimentos de ligas autofluxantes, pois densifica o revestimento eliminando grande parte dos poros. Pontos que requerem cuidados na fusão são:

- Controle adequado da temperatura de fusão, para evitar trincamentos ou degradação do revestimento o tornando frágil.
- Na solidificação ocorre uma contração do material, em torno de 20% e caso haja necessidade de um controle dimensional do revestimento, se deve prever uma espessura adicional.

7 MATERIAIS UTILIZADOS PARA ASPERSÃO TÉRMICA

Os materiais utilizados na AT como revestimento podem ser qualquer material que não se decomponha. E na prática, uma grande quantidade de materiais, incluindo a maioria dos metais e suas ligas, materiais cerâmicos, compósitos, carbonetos e boretos podem ser depositados por AT.

Inicialmente o material encontra-se na forma de vareta ou arame e pó e devido ao processo a composição química do material depositado é diferente do material de partida. E no aquecimento, pode ocorrer a queima de alguns constituintes da liga, sendo que para garantir a composição desejada será necessário prever que alguns componentes devem estar em excesso e outros reduzidos.

7.1 MATERIAIS AUTO LIGANTES

Os materiais auto ligantes são utilizados como uma técnica adicional de se conseguir uma preparação do substrato, ou seja, conferir a ele a rugosidade adequada. Estes materiais têm grande capacidade de ligação adesiva mesmo em substratos lisos e quando aplicados a substratos que passaram por um jateamento abrasivo, melhoram a aderência do revestimento.

A Tabela 13 apresenta a temperatura máxima de serviço de alguns materiais auto ligantes.

Tabela 13 – Limite máximo para temperaturas de serviço para alguns materiais auto ligantes.

Material	Temperatura (°C)
Molibdênio	315
80Ni-20Al	620
95Ni-5Al	1010
80Ni-20Cr	1260
94NiCR-6Al	980

Os materiais mais utilizados como camadas de ligação incluem ligas de níquel-alumínio, bronze-alumínio, níquel-cromo, molibdênio, ligas MCrAlY, no qual M é níquel, cobalto, molibdênio ou ferro.

7.2 MATERIAIS FERROSOS

Os materiais ferrosos para AT apresentam-se principalmente na forma de arame e estes aços se classificam em aços carbono e aços inoxidáveis. Como a grande maioria dos elementos de máquinas e componentes mecânicos são fabricados de aço carbono ou aços baixa liga, quando se trata de recuperação destes componentes que sofreram desgaste, podem ser revestidos com aço de baixo, médio ou alto carbono dependendo das condições de trabalho.

O teor de carbono é fator de escolha também quando for necessário realizar um acabamento superficial após AT, se o revestimento for de médio ou alto carbono, exigirá uma retificação devido a alta dureza proveniente de a aplicação resultar em tempera das partículas aspergidas. Entretanto a estas camadas é conferido um elevado grau de resistência ao desgaste.

Os aços inoxidáveis austeníticos da família AISI 3XX são utilizados para proteção contra a corrosão e os aços inoxidáveis martensíticos são empregados onde necessita se razoável resistência a corrosão e boa resistência ao desgaste devido a capacidade de serem temperáveis. A Tabela 14 apresenta alguns materiais ferrosos de aplicação na AT.

Tabela 14 – Composição e forma de alguns materiais ferrosos.

Composição % em peso	Formas disponíveis		Descrição
	pó	aramé	
Mn 0,5; C 0,10; Fe balanço	x	x	Aço baixo carbono
C 0,80; P 0,04; S 0,04; Mn 0,7; Fe b resto		x	Aço alto carbono
Al 10,0; Mo 1,0; C 0,2; Fe resto	x		Aço liga baixo carbono
Al 3,0; Mo 3,0; C 3,0; Fe resto	x		Aço liga alto carbono
C 0,15; P 0,06; S 0,03; Mn 8,5; Ni 5,1; Cr 18,0; Si 1,0; Fe resto		x	Aço inoxidável tipo 202
Cr 17,0; Ni 12,0; Mo 2,5; Si 1,0; C 0,1; Fe resto	x	x	Aço inoxidável tipo 316
Cr 19,0; Ni 9,5; Mn 2,0; Si 1,0; Fe b resto	x	x	Aço inoxidável tipo 304
C 0,35; Cr 13,0; Si 0,5; Fe resto		x	Aço inoxidável tipo 420

7.3 MATERIAIS NÃO FERROSOS

Os materiais não ferrosos são assim classificados por não apresentarem ferro em sua composição ou que tenham seu teor muito baixo, como o cobre e suas ligas que tem preferência quando sua utilização é em indústria gráfica ou elétrica por que ele fornece resistência à corrosão, alta condutividade elétrica.

O zinco confere ao ferro proteção galvânica do tipo anódica, ligas de bronze têm aplicações típicas em situações de elevada fricção, as ligas de monel para a proteção contra a corrosão. O alumínio é empregado contra a corrosão marinha e na corrosão a altas temperaturas, principalmente quando está associado a gases ricos em compostos de enxofre.

O alumínio tem boa afinidade com ferro e, mesmo na temperatura ambiente, ocorre uma difusão entre eles. A velocidade de difusão aumenta com a temperatura e, a 650 – 660°C, rapidamente, forma-se uma zona de difusão do alumínio e dependendo do tempo a esta temperatura é possível a formação de intermetálicos FeAl. Estas ligas são mais duras que o aço e são também bastantes resistentes a corrosão, uma vez que, mesmo com o teor de 5% de Al na liga, ainda permanece a capacidade de formação de óxido de alumínio, que é responsável pela resistência a corrosão, (CORTÉS, 1998). E este óxido é extremamente estável e, tão logo seja formada a película que isola o metal do meio ambiente, a reação cessa. Por este motivo, a durabilidade de um revestimento de alumínio pode ser função de um desgaste mecânico que remova a película de óxido ou por perda do metal na difusão para dentro do aço.

Metais como o estanho e chumbo quando ligados com antimônio e cobre formam ligas anti-fricção, também conhecida como metal patente. E metais puros como o níquel e molibdênio também são disponíveis para a deposição por AT. O níquel é utilizado por suas propriedades de resistência a corrosão e o molibdênio por suas características auto-lubrificantes. A TABELA 15 mostra os principais materiais não ferrosos utilizados na AT.

Tabela 15 – Materiais não ferrosos utilizados na AT.

Composição % em peso	Formas disponíveis		Descrição
	pó	Arame	
Al 95,0; Fe 1,0; Cu resto	x	x	Bronze alumínio
Si 12,0, Al resto		x	Liga AlSi
Al 99,0 +	x	x	Al puro
Cu 99,0 +	x	x	Cobre desoxidado
Ni 38,0; Cu resto	x	x	Monel
Zn 99,9 +		x	Zinco puro
Cu 66,0; Zn 34,0		x	Latão
Cu 95,0; Sn 5,0		x	Bronze fosforoso
Sn 90,0; Sb 12,5; Cu 3,0		x	Metal patente base estanho
Pb 78,0; Sb 12,5; Sn 10,0; Cu 0,5		x	Metal patente base chumbo
Zn 85,0; Al 15,0		x	Liga ZnAl

7.4 MATERIAIS CARBETOS

Os materiais carbetos empregados na AT apresentam-se quase sempre na forma de pós e seu revestimento tem melhores propriedades quando aplicados pelos seguintes processos, FS, ASP, detonação e HVOF, mas os revestimentos aplicados através do processo FS não apresentam boa repetibilidade.

Os carbetos mais empregados são os de tungstênio e o de cromo. O carbeta de tungstênio tem ótimas propriedades de resistência ao desgaste e o carbeta de cromo é resistente a altas temperaturas de serviço. E quando se mistura o carbeta de cromo em uma matriz de NiCr pode se trabalhar com temperaturas de faixa de 540 a 815°C e continua resistente ao desgaste abrasivo.

7.5 MATERIAIS CERMETS

Os cermets são constituídos por uma mistura de cerâmicas com ligas metálicas e seu revestimento é formado pelas melhores propriedades de seus componentes. Com depósitos mais densos, bastante resistentes a abrasão e com menor sensibilidade a choques mecânicos do que as

cerâmicas puras. Como barreira térmica apresenta bons resultados, mas não alcançam os resultados obtidos com materiais cerâmicos.

7.6 MATERIAIS AUTOFLUXANTES

Os materiais autofluxantes apresentam-se sob a forma de pó e são geralmente ligas NiCr ou CoCr com adições de boro, silício, molibdênio, carbono e cobre. Eles produzem camadas bastante densas, resistentes a corrosão e com durezas variáveis desde uns 30 até 60 HRC, dependendo da composição dos pós. Estes materiais são aplicados por meio de equipamento a chama FS e sofrem em seguida tratamento térmico entre 1000 a 1100°C para fundir a camada. E após a fusão, a camada adquire todas as suas propriedades dureza que inclusive se mantém ainda bastante elevada, mesmo em temperaturas da ordem de 700 a 750°C. Eles são empregados em aplicações na qual se encontrem o conjunto de problemas com abrasão, corrosão e altas temperaturas.

7.7 MATERIAIS OXI-CERÂMICOS

Estes materiais possuem elevado ponto de fusão e quando a aplicação é realizada pelo processo a chama os resultados não são satisfatórios. O processo tem energia para fundir o material, mas não fornece um sobreaquecimento para que partícula vença a distância da pistola até o substrato sem baixar a temperatura e sem perder muito sua velocidade, causando baixa aderência. E quando o processo de aplicação é a arco plasma os resultados são melhores.

A TABELA 16 apresenta a composição dos principais materiais autofluxantes, cermets, oxi-cerâmicos e carbetos.

Tabela 16 – Composição de ligas especiais.

Composição % em peso	Formas disponíveis		Descrição
	pó	arame	
Cr ₃ C ₂ 99,9	x		Carbeto de cromo
Cr ₃ C ₂ 75; Ni 20; Cr 5	x		Carbeto de cromo em matriz de níquel cromo
Co 12; C 4; Fe 1; W resto	x		Carbeto de tungstênio em matriz de cobalto
Al ₂ O ₃ 98,0; SiO ₂ 0,5; outros 0,5	x		Cerâmica a base de óxido de alumínio branco
Al ₂ O ₃ 94,0; TiO ₂ 2,5; SiO ₂ 2,0; FeO ₃ 1,0; outros resto	x	x	Cerâmica a base de óxido de alumínio cinza
		vareta	
Cr ₂ O ₃ 98	x		Cerâmica a base de óxido de cromo
Al ₂ O ₃ 87; TiO ₂ 13	x		Oxi-cerâmico a base de óxido de Al.
TiO ₂ 99,0	x		Oxi-cerâmico a base de dióxido de titânio
MgO 24; ZrO ₂ resto	x		Oxi-cerâmico a base de zirconato de magnésio
Cr 10; B 2,5; Fe 2,5; Si 2,5; C 0,15; Ni resto	x	x Ø 1/8"	Autofluxante de média dureza
Cr 17; Fe 4,0; Si 4,0; B 3,5; C 1,0; Ni resto	x	x Ø 1/8"	Autofluxante de alta dureza

8 PROCEDIMENTOS DE SEGURANÇA

Os processos de AT possuem medidas de precaução muito semelhantes a processos de soldagem quanto à saúde, segurança e meio ambiente. Mas os outros processos como preparação da superfície e acabamento também têm seu risco associado e junto às medidas de segurança que devem ser tomadas para prevenir acidentes.

As características de cada processo de AT criam um conjunto de riscos para a segurança do operador a norma PETROBRÁS N-2568 traz os requisitos de segurança para cada etapa do processo e o que e como deve ser verificado encontra se no ANEXO 3.

A segurança se faz necessária, pois os envolvidos na aplicação de qualquer que seja o processo de AT estão sujeitos aos seguintes riscos:

- Poeiras.
- Fumos e vapores de gases.
- Níveis altos de ruídos.
- Alta velocidade das partículas
- Exposição a fontes de alta energia elétrica ou sistemas oxcombustíveis, que geram altas temperaturas e radiação.

Quanto a níveis de ruído a TABELA 17 mostra o máximo tempo de permanência que uma pessoa pode permanecer em um ambiente relacionado com o nível de ruído que se está exposto. A TABELA 18 trás um resumo das características de alguns processos quanto à temperatura, nível de ruído e distância de aplicação.

Tabela 17 – Limite de tempo para exposição por dia por nível de ruído de (OSHA 3151-12R, 2003).

Nível de ruído (dB)	Tempo de exposição por dia
90	8 horas
92	6 horas
95	4 horas
97	3 horas
100	2 horas
102	1:30 hora
105	1 hora
110	30 minutos
115	15 minutos

Tabela 18 – Características de risco de alguns processos de AT, modificado de (AWS, 1997).

Características	Processos				
	Chama oxiacetilênica FS	Chama de alta velocidade HVOF	Arco elétrico ASP	Arco plasma PS	Plasma de indução RFPS
Temperatura (°C)	2760	3316	2200 - 8315	2200 - 8315	+ de 16650
Velocidade (m/s)	60 - 200	760 - 1220	240 - 330	240 - 550	240 - 550
Nível de ruído (dBA)	110	150	115	132	132
Distância do jato (mm)	100 - 250	150 - 455	60 - 150	60 - 150	75 - 200

7. Custo de Aplicação dos Revestimentos [2].

Na Europa o custo de aplicação de revestimentos de Al com espessura de 200µm varia de 60-200 US\$/m², com um valor médio em torno de 140US\$/m². Esta variação se deve a diferenças nos requisitos contidos nas especificações utilizadas na indústria “offshore” .

Nos EUA o custo para aplicação de revestimentos de Al (espessura de 250µm) em canteiro tem sido estimada em 60US\$/m² a 90US\$/m², aplicados por ASP e chama FS. Outras fontes, para aplicação do Al nos EUA, apresentam valores variando de 97-116 US\$/m², enquanto um sistema de pintura em três demãos custava cerca de 38 US\$/m².

O custo/kg dos arames é um aspecto que deve ser considerado. No Brasil os valores médios de mercado para arames de 1/8” são os seguintes: Al (R\$5,7/kg), Zn (R\$4,8/kg) e 85Zn15Al (R\$11,1/kg). A eficiência de depósito (kg/m²/µm) destes materiais é: Al (0,0029), Zn (0,011), 85Zn15Al (0,0093). Estes valores apontam para uma clara vantagem econômica do Al. O zinco apresenta ainda as desvantagens de emitir gases extremamente tóxicos ao aplicar quando utilizado o processo ASP, sendo bastante conhecida a chamada febre de zinco. Além disso, este material, acima de 60 °C tem sua polaridade invertida em relação ao aço o que é especialmente pronunciado em revestimentos depositados por AT.

Na Petrobras contratos da E&P-BC (processos FS e ASP) apontam valores de custos de R\$70/m² (canteiro/terra) até R\$320/m² (offshore). Em comparação, sistemas de pintura a base de etil silicato tem fornecido, a partir de contratos da E&P-BC, valores de R\$20/m² (canteiro/terra, preparo de superfície jato úmido), R\$80 (offshore, preparo de superfície St3*) e 120/m²

(“offshore”, preparo de superfície com jato úmido). Além desses, dados fornecidos por aplicadoras no Brasil, evidenciam que os custos envolvidos na deposição de Al puro (200µm) através do processo HVOF variam de R\$150/m² até R\$840/m².

Os revestimentos com sistemas de pintura em plataformas “offshore” da Petrobras apresentam vida média variam de 1-4 anos dependendo, principalmente, do tipo de preparo de superfície, e implicam num exaustivo trabalho de manutenção, especialmente em tubulações, como em válvulas. A utilização dos revestimentos de Al em unidades “offshore” da Petrobras é ainda recente. Queimadores, lanças de guindastes, “risers” de complementação e perfuração são alguns exemplos positivos, datando no máximo 6 anos de exposição ao meio marinho.

(* St Grau de preparação com ferramenta mecânicas, onde St3 é limpeza minuciosa para remoção de toda carepa de laminação solta e outras impurezas).

7.1. Custos de Aspersão Térmica.

- Os custos na aspersão térmica devem de incluir as seguintes atividades:

- 1) Custos da pre-limpeza e limpeza (CL);
- 2) Custos da preparação da superfície através de usinagem e/ou jateamento abrasivo (CPS);
- 3) Custos da aspersão térmica (CAT).

Logo: **Custo total = CL + CPS + CAT**, onde:

CL: representa os custos inerentes à limpeza da superfície a ser metalizada (Sa3, Sa2,5, St3), é depende do grau de corrosão e/ou desgaste do material, sendo realizada através de: processos químicos, mecânicos ou jateamento abrasivo.

CPS: representa os custo inerentes à preparação da superfície a ser metalizada e considera a obtenção de limpeza de acordo a norma junto com a obtenção de rugosidade da superfície. No caso do jateamento abrasivo deve-se considerar os custos do fornecimento do ar comprimido, do abrasivo utilizado e os custos da mão de obra.

CAT: representam os custos diretamente relacionados com a metalização e sua estimação depende das características físicas das peças ou material a ser metalizados. Algumas regras práticas são recomendadas:

- Ao calcular a área, deve dar-se uma tolerância para perdas nas extremidades e/ou bordas. No caso de recuperação de peças cilíndricas é uma norma geral a de adicionar uma polegada (2,5 cm) onde existe extremidade (para compensar as perdas).

Formulas para o calculo da área:

- circunferência de um circulo = πD onde $\pi = 3.14$; R = radio; D = diâmetro; b =
- área de um circulo = πR^2 base; L = comprimento; h = altura e r = raio da
- área de um cilindro = $\pi D L$ base.
- área de uma esfera = πD^2
- área de um triângulo = $bh/2$
- área de um paralelograma = bh
- área (lateral) de um cone = $\pi r \sqrt{r^2 + h^2}$

Calculo dos custos: um fator importante que se deve levar em consideração ao calcular os custos é a variação normal da espessura do revestimento entre o ponto mais fino e o ponto mais grosso. Para os revestimentos resistentes à corrosão, deve ser usada a espessura média do revestimento para o calculo dos custos. Contudo, se uma espessura mínima de revestimento é especificada, aplicar uma espessura média suficiente para que nenhum ponto seja mais fino do que o mínimo especificado. No caso que esta especificação não puder ser calculada, deve-se preparar um corpo de prova ou uma área de ensaio do lugar a metalizar para determinar a espessura média pretendida.

Exemplo de cálculo: Metalização de um cilindro que tem 1.150 mm de comprimento x 120 mm de diâmetro. Quer-se aumentar em 4 mm seu diâmetro. Material a utilizar como revestimento: arame SPRASTEEL 80 de 1/8 de ϕ . Dispõe-se da pistola tipo 12E METCO, para a formação da chama utilizar gás acetileno e dados da Tabela 9-5 (Tabela de metalização – sistema métrico).

Procedimento de calculo:

1. Calculo da área a ser metalizada [CA].
2. Calculo do volume do revestimento [CV].
3. Calculo do tempo necessário de metalização [CTd].
4. Calculo do peso do arame necessário [CPA].
5. Calculo do consumo de ar, oxigênio e acetileno [CC = Car; COx.; CAc.]
6. Custo de mão de obra, operador, ajudante, supervisão, etc. [CMO].

7. Cálculo do custo total da aspersão térmica [CAT].

$$\mathbf{CAT = CA + CV + CTd + CPA + CC + CMO}$$

Para o cálculo final deve-se incluir os custos inerentes à matéria-prima utilizada:

Custo arame = custo por kilo x quantidade utilizada;

Custo ar = custo por m³ x m³ consumidos;

Custo oxigênio = custo por m³ x m³ consumidos;

Custo acetileno = custo por m³ x m³ consumidos;

Custo mão de obra = custo mão de obra por hora x tempo utilizado.

REFÊRENCIAS

LIMA, C. C., TREVISAN, R. Aspersão Térmica: Fundamentos e Aplicação. São Paulo – Artliber Editora, 2002.

CORTÉS P. R. Tese de doutorado. Estudo de revestimentos de alumínio depositados por três processos de aspersão térmica para a proteção do aço contra a corrosão marinha. UFSC 1998.

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

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

AWS - American Welding Society, Inc. Thermal Spraying. Practice, Theory, and Applications. 1985.

AWS - American Welding Society –Thermal spraying safety. Safety and health fat sheet number 20. 1997.

ASM Metals Handbook Volume 5 – Surface engineering. 1994.

OSHA 3151-12R 2003 – Occupational safety and health administration. Personal protective equipment.

ABS - Associação Brasileira de Soldagem / Curso de Metalização. 1994

GIMENES, L, SANTOS, E. F, TOLEDO, L. B, CARRILHO, M. S. Comparativo entre os processos de aspersão térmica na manutenção. Acesso no dia 14/04/09 às 10:00 horas. <http://www.infosolda.com.br/nucleo/downloads/pb.pdf>.

MARQUES, P. V. Aspersão Térmica. Infosolda -2003. Acesso no dia 06/04/2009 às 09:35 horas. <http://www.infosolda.com.br/artigos/prosol05.pdf>.

MENEZES, D. D. Tese de doutorado. Avaliação da resistência à corrosão de revestimentos de alumínio aplicados pelas técnicas de arco elétrico e chama convencional, em meio cloreto. UFRJ 2007.

SENAI-RJ. Apostila de aspersão térmica, módulo básico. 2005.

<http://www.uniquecoat.com/PDF/Articles/itsc'2004.pdf>.

Acesso no

dia 07/04/2009 às 10:30 horas.

<http://www.uniquecoat.com/PDF/Articles/itsc'2003.pdf>.

Acesso no dia

07/04/2009 às 11:15 horas.

<http://www.gordonengland.co.uk>

Acesso no dia

09/04/2009 às 18:30.

<http://www.advanced-coating.com>. Acesso no dia 09/04/2009 às 18:45.

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

HOWARD, L. Modern welding technology. Fourth edition.

LEE, K.H., Park, J.H., Ye, K.H., (2006), *Acoustic Emission Source Analysis of Vacuum Plasma Sprayed CoNiCrAlY Coatings*, Journal of the Korean Physical Society, Vol. 48 (6), 1691-1695.

Norma PETROBRAS N-2568, Revestimentos anticorrosivos aplicados por aspersão térmica. Janeiro 2004.

ASTM-C633 – Standard Test Method for Adhesion or cohesive strength of flame sprayed coating. 1979.

ASTM-E18-94 – Standard test methods for Rockwell hardness and Rockwell superficial hardness of metallic materials. 1994.

MIL-STD 2138A – Military Standard, USA. Metal sprayed coatings for corrosion protection aboard naval ships (Metric). 13/05/1992.

SCHIEFLER, M.F., BUSCHINELLI, A.J.A., KREYE, F.G., 2002, "Estudo Eletroquímico e Microestrutural de Revestimentos Aspergidos Termicamente para a Proteção do Aço contra a Corrosão Marinha", 22º Congresso Brasileiro de Corrosão (Conbrascorr), Salvador, Bahia, 19-21 de agosto de 2002.

SCHIEFLER, M.F. et al. Influence of process parameters on the quality of thermally sprayed X46Cr13 stainless steel coatings. COBEF 2003.

ZHANG, H, et al. Studies of splat morphology and rapid solidification during thermal spraying. International Journal of Heat and Mass Transfer. March 2001.

PAREDES, R.C., RODRIGUEZ, R. M. H. P., CAPRA, A., VIANNA, G. V., PIZA, M.T., 2003, "Resistência à Corrosão de Revestimentos de Alumínio no Ensaio de Névoa Salina", 7ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos (COTEQ), Florianópolis, SC, Brasil, 9-12 Setembro.

ZIMMERMANN, S. and KREYE, H. Testes de corrosão em camadas termicamente aspergidas. Curso de especialização "Proteção contra a corrosão por revestimentos depositados por aspersão térmica", realizado na UFSC/EMC/Labsolda - Florianópolis. Abril 1997.

RODRIGUEZ, R. M. H. P, SILVA, J. M. LIMA, D. F. B. PAREDES, R. S. C. Formação de óxidos e alumínio na aspersão térmica. 2002.

RODRIGUEZ, R. M. H. P, SILVA, PAREDES, R. S. C. Proteção contra a corrosão marinha – comparação de revestimentos de alumínio depositados por aspersão térmica com ar comprimido, argônio e nitrogênio. Segundo congresso brasileiro de P&D em petróleo e gás.

RAMANATHAN, L.V., Corrosão e seu Controle, Brasil, Hemus Editora, São Paulo, Brasil. 1994.

ANEXOS

ANEXO 1 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS EM FUNÇÃO DE SEUS TAMANHOS NOMINAIS (MARQUES, 2003)

Peneira nº	Tamanho do abrasivo																							
	6	8	10	12	14	16	20	22	24	30	36	40	46	54	60	70	80	90	100	120	150	180	220	240
4	0																							
5	15																							
6	45	0																						
7	25	15	0																					
8	12	45	15	0																				
10	3	30	45	15	0																			
12		7	30	45	15	0																		
14		3	7	30	45	15	0	0																
16			3	7	30	45	15		0															
18				3	7	30	45	20		0														
20					3	7	30	45	20		0													
25						3	7	25	45	25		0												
30							3	7	25	45	25		0											
35								3	2	25	45	25		0										
40									3	2	25	45	30		0									
45										3	2	25	40	30		0								
50											3	2	25	40	30		0							
60												3	2	25	40	15		0						
70													3	2	25	45	25		0					
80														3	2	25	40	15		0				
100															3	12	30	45	15		0			
120																3	7	30	45	15		0		
140																	3	12	20	30	15		0	
170																		3	10	30	20	15		0
200																			7	15	20	20	15	5
230																			3	7	35	20	20	
270																				3	7	25	20	8
325																					3	17	20	30
325																						3	25	57

ANEXO 2 – DIMENSÕES PADRÃO DE PENEIRAS (MARQUES, 2003)

Dimensões padrão de peneiras					
Designação Padrão da peneira (mm)	Abertura nominal (pol.)	Variação permitida (mm)	Abertura média máxima (mm)	Abertura individual máxima (mm)	Diâmetro nominal do arame (mm)
125	5,00	±3,70	130,0	130,9	8,00
106	4,24	±3,20	110,2	111,1	6,40
100	4,00	±3,00	104,0	104,8	6,30
90	3,50	±2,70	93,6	94,4	6,08
75	3,00	±2,20	78,1	78,7	5,80
63	2,50	±1,90	65,6	66,2	5,50
53	2,12	±1,60	55,2	55,7	5,15
50	2,00	±1,50	52,1	52,6	5,05
45	1,75	±1,40	46,9	47,4	4,85
37,5	1,50	±1,10	39,1	39,5	4,59
31,5	1,25	±1,00	32,9	33,2	4,23
26,5	1,06	±0,80	27,7	28,0	3,90
25,0	1,00	±0,80	26,1	26,4	3,80
22,4	0,875	±0,70	23,4	23,7	3,50
19,0	0,750	±0,60	19,9	20,1	3,30
16,0	0,625	±0,50	16,7	17,0	3,00
13,2	0,530	±0,41	13,83	14,05	2,75
12,5	0,500	±0,39	13,10	13,31	2,67
11,2	0,438	±0,30	11,75	11,94	2,45
9,5	0,375	±0,25	9,97	10,16	2,27
8,0	0,312	±0,21	8,41	8,58	2,07
6,7	0,265	±0,20	7,05	7,20	1,87
6,3	0,250	±0,18	6,64	6,78	1,82
5,6	0,223	±0,15	5,90	6,04	1,68
4,75	0,187	±0,13	5,02	5,14	1,54
4,00	0,157	±0,11	4,23	4,35	1,37
3,35	0,132	±0,095	3,55	3,66	1,23

ANEXO 2 – CONTINUAÇÃO

Dimensões padrão de peneiras					
Designação Padrão da peneira (mm)	Abertura nominal (pol.)	Variação permitida (mm)	Abertura média máxima (mm)	Abertura individual máxima (mm)	Diâmetro nominal do arame (mm)
2,8	0,111	±0,080	2,975	3,07	1,10
2,36	0,0937	±0,070	2,515	2,60	1,00
2,00	0,0787	±0,060	2,135	2,215	0,900
1,70	0,0661	±0,050	1,820	1,89	0,810
1,40	0,0555	±0,045	1,505	1,565	0,725
1,18	0,0469	±0,040	1,270	1,330	0,650
1,00	0,0394	35 µm	1,080	1,135	0,580
0,85	0,0331	30 µm	925 µm	970	0,510
0,71	0,0278	25 µm	775 µm	815	0,450
0,60	0,0234	20 µm	660 µm	695	0,390
0,50	0,0197	19 µm	550 µm	585	0,340
0,425	0,0165	16 µm	471 µm	502	0,290
0,355	0,0139	14 µm	396 µm	425	,0247
300	0,0117	12 µm	337 µm	363	0,215
0,250	0,0098	10 µm	283 µm	306	0,180
0,212	0,0083	9 µm	242 µm	263	0,152
0,180	0,0070	8 µm	207 µm	227	0,131
0,150	0,0059	7 µm	174 µm	192	0,110
0,125	0,0049	6 µm	147 µm	163	0,091
0,106	0,0041	5 µm	126 µm	141	0,076
0,090	0,0035	5 µm	108 µm	122	0,064
0,075	0,0029	4 µm	91 µm	103	0,053
0,063	0,0025	4 µm	77 µm	89	0,044
0,053	0,0021	3 µm	66 µm	76	,037
0,045	0,0017	3 µm	57 µm	66	0,030
0,038	0,0015	-	48 µm	57	0,025

ANEXO 3 – REQUISITOS DE SEGURANÇA PARA O PROCESSO DE SOLDAGEM DE ACORDO COM A NORMA PETROBRÁS N-2568

A.3.1 Gases para Aspersão Térmica

- Inspeccionar todos os equipamentos regularmente atentando para vazamentos e conexões soltas.
- Os cilindros carregados devem ser mantidos afastados de qualquer fonte de calor. Deve-se evitar também o seu tombamento. Quando os cilindros não estiverem sendo usados deve-se manter o gás fechado assim como colocar protetores nas válvulas.
- Não pendurar a pistola de aspersão térmica no regulador ou na válvula do cilindro. Providenciar um local de fácil acesso para estocagem dos equipamentos.
- Providenciar ventilação adequada da área de trabalho antes de abrir qualquer das válvulas de gás. Nenhum local deve ser considerado como limpo ou seguro antes de uma certificação de um inspetor de segurança.
- Nunca apontar a mangueira de gás ou ar ou qualquer outro item pressurizado contra o corpo humano.

A.3.2 Precauções durante o Jateamento

- Cuidados devem ser tomados antes do jateamento caso se tenha risco de fogo ou explosão. Se a estrutura a ser jateada estiver contaminada com materiais inflamáveis deve-se purgar os elementos perigosos. Antes de iniciar o trabalho de jateamento o local deve ser liberado pelo inspetor de segurança.
- Durante o jateamento deve ser providenciada proteção adequada para o rosto, olhos, pescoço e queixo do jateador devido às partículas abrasivas.
- Óculos de proteção devem ser usados por todas as pessoas próximas ao serviço de jateamento.
- A mangueira da pistola de jateamento deve ser aterrada para dissipar cargas estáticas.
- Nunca apontar a pistola de jateamento contra qualquer parte do corpo humano.

A.3.3 Pistola de Aspersão Térmica

- As pistolas de aspersão térmica devem ser mantidas de acordo com as especificações do fabricante.
- Não acenda a pistola de aspersão térmica sem que o arame esteja no bico. Caso contrário a chama pode se mover para dentro do guia do arame, danificando o bocal, o guia, seus rolamentos e causando danos ao operador.
- Não usar fósforos para acender a pistola de aspersão térmica já que existe o risco de se queimarem as mãos. É prática recomendada o uso de acendedores por fricção ou iniciadores de arco.

A.3.4 Redução dos Riscos Respiratórios

- Um sistema de exaustão positivo deve ser providenciado em trabalhos de aspersão térmica em áreas fechadas. Para evitar os efeitos tóxicos ou de irritação gerados por fumos, sujeira ou névoa, devido a aspersão térmica, as instalações devem ter dispositivos e EPI (Equipamento de Proteção Industrial) adequados para respiração e circulação de ar.
- No caso de os operadores apresentarem desconfortos respiratórios (náuseas ou tonteiras), devido a respiração da névoa de material fundido (alumínio, zinco) gerada durante a aspersão térmica, o trabalho deve ser interrompido imediatamente de modo a se verificar o funcionamento dos sistemas de ventilação e exaustão antes do retorno à operação.

A.3.5 Proteção Pessoal

- Não se deve permitir a entrada de detritos oriundos da aspersão nos olhos, boca e feridas abertas. Após o trabalho de aspersão térmica e antes de comer ou manusear comida deve-se lavar as mãos vigorosamente.
- As partículas de alumínio metálico dispersas no ar são potencialmente explosivas e quando úmidas criam um risco de combustão espontânea. Ventilação deve ser providenciada para que se tenha fluxo de ar em todo o local de trabalho.

A.3.6 Roupas de Proteção

- Roupas resistentes ao calor e luvas de couro raspa aluminizadas com punho largo e comprido devem ser usadas.
- As roupas devem ser amarradas bem firmemente ao corpo principalmente em torno dos pulsos e tornozelos.

A.3.7 Redução do Nível de Ruído

- O uso de protetores de audição ou cilindros de borracha é obrigatório não sendo permitido o uso de algodão para este fim.

A.3.8 Proteção Visual

- Óculos de proteção, protetor lateral da face e capacetes devem ser usados pelos operadores tanto para o jateamento quanto para a aspersão térmica. Os ajudantes devem usar óculos de proteção.
- Durante a aspersão térmica os óculos de proteção, capacetes ou protetores de face devem estar equipados com filtros de proteção contra a radiação.
- Os óculos de proteção devem ter ventilação indireta para eliminar o risco de entrada de partículas e reduzir o embaçamento das lentes.

A.3.9 Ar Comprimido

- Nunca usar ar comprimido ou oxigênio ou gases de combustão para a limpeza de roupas.
- Não usar ar comprimido durante o jateamento ou aspersão térmica em pressões diferentes daquelas especificadas pelo fabricante dos equipamentos.

A.3.10 Exaustão em Espaços Confinados e/ou Fechados

- Para espaços confinados (ex.: interior de vaso de pressão) deve ser previsto acesso para pessoal em seu interior (jatista, aplicador, inspetor). Um segundo acesso deve ser

providenciado para a sua ventilação. Em ambientes fechados deve ser prevista a presença constante de um elemento próximo ao operador.

- Em locais fechados em que operações de jateamento estejam sendo executadas devem-se providenciar condições para que a mudança do ar ocorra pelo menos uma vez a cada minuto. É necessário manter nas operações de aspersão térmica em ambientes fechados uma velocidade do ar de 10 - 15 m/s com vazão mínima de três vezes o volume do espaço considerado (em m³/min).
- As entradas de ar devem estar posicionadas na parte mais alta do espaço considerado e no lado oposto ao serviço de aspersão térmica. A saída de ar deve estar posicionada na parte inferior e próxima ao chão, junto à área de trabalho. O duto de exaustão deve ser largo o suficiente para que a vazão de ar necessária seja alcançada.