

Aspersão Térmica¹

Paulo Villani Marques

Fundamentos

A aspersão térmica consiste de um grupo de processos nos quais partículas finamente divididas de materiais para revestimentos, metálicos ou não metálicos, são depositadas sobre um substrato devidamente preparado, na condição fundida ou semi-fundida, para formar uma camada superficial. O calor necessário para a operação é gerado na tocha de aspersão e pode vir da queima de um gás combustível ou da geração de um arco elétrico. As partículas aquecidas são aceleradas por um gás comprimido, confinadas num feixe, e dirigidas ao substrato. Ao se chocarem, as partículas se achatam e formam finas lentes, que se conformam e aderem às irregularidades superficiais e entre si. Com a continuidade do processo, as partículas se resfriam, formando um revestimento com estrutura lamelar.

Os processos de aspersão térmica são especializados e têm larga utilização tanto na fabricação quanto na manutenção. A natureza dos processos é sinérgica, isto é, o número de componentes e variáveis envolvidos é grande e, quando adequadamente escolhidos em conjunto e devidamente aplicados, produzem um efeito muito maior do que quando considerados individualmente. Ainda, cada componente ou variável deve ser bem entendido, para permitir sua escolha e operação adequada, em cada processo em particular.

As variações básicas nos processos de aspersão térmica se referem ao material a ser aplicado, ao método de aquecimento e ao método de aceleração das partículas em direção ao substrato.

Os materiais podem ser fornecidos na forma de vareta, arame, cordão (tubo de plástico contínuo) e pó. Metais, óxidos, compostos intermetálicos, cermets, plásticos orgânicos e alguns vidros podem ser depositados por uma ou mais variações de processos.

Os processos de aspersão térmica podem ser classificados em dois grupos básicos, dependendo da fonte de calor usada, como mostrado na Tabela I.

Tabela I - Processos de aspersão térmica

Combustão	Elétrico
Chama	Plasma
Detonação	Arco

O sucesso no uso de revestimentos aspergidos termicamente depende basicamente de sua aplicação cuidadosa, segundo procedimentos bem estabelecidos. Qualquer desvio destes procedimentos levam, em geral, a resultados não confiáveis. Os revestimentos termicamente aspergidos apresentam três aspectos básicos: o substrato, a adesão do revestimento e a estrutura deste.

Os substratos sobre os quais os revestimentos termicamente aspergidos podem ser aplicados incluem metais, óxidos, cerâmicos, vidros, a maioria dos plásticos e madeira, sendo que algumas técnicas especiais podem ser necessárias. Nem todos os materiais para aspersão podem ser aplicados a qualquer tipo de substrato. Uma preparação adequada deste é necessária antes da aspersão propriamente dita, independentemente do processo a ser usado. Essa preparação é essencialmente a mesma para cada processo a ser usado e consiste de duas etapas básicas: limpeza da superfície para eliminar contaminantes e obtenção de rugosidades para aumentar a área superficial efetiva e melhorar a adesão.

A ligação ou adesão entre revestimento e substrato pode ser mecânica, química e/ou metalúrgica e é influenciada por diversos fatores, tais como: material do revestimento, condição do substrato, rugosidade, limpeza e temperatura da superfície a ser revestida, antes e durante o processo e velocidade de impacto das partículas.

¹Baseado em *Thermal spraying - Practice, theory and application*. American Welding Society, Inc. Miami, 1985. 170 p

A estrutura e a química do depósito aspergido em ar (figura 1) é diferente do material no estado original. Estas diferenças são devidas à natureza progressiva do revestimento, à reação com gases durante o processo e à atmosfera em contato com o material enquanto líquido. Por exemplo, quando ar ou oxigênio são usados, óxidos podem ser formados e se incorporarem ao revestimento. Revestimentos metálicos tendem a ser porosos e frágeis, com uma dureza diferente do material original. A estrutura de revestimentos na condição como aspergidos é similar quanto à natureza lamelar, mas pode exibir diferentes características em função do processo, dos parâmetros, da técnica e do material usados. A densidade do depósito varia com a temperatura da fonte

de calor usada (Tabela II) e com a velocidade das partículas no impacto (figura 2).

A aplicação final determina as propriedades necessárias para o revestimento e o tipo de consumível e equipamentos necessários. Revestimentos termicamente aspergidos têm sido usados intensivamente na fabricação de componentes nas indústrias automotiva, de petróleo, elétrica, eletrônica, geração de energia, e particularmente na aeroespacial. Em manutenção, milhões de dólares têm sido economizados com o uso da aspersão térmica. Ela tem sido usada tanto em oficina como no campo, no revestimento de estruturas e partes de equipamentos, com economia de tempo e recursos.

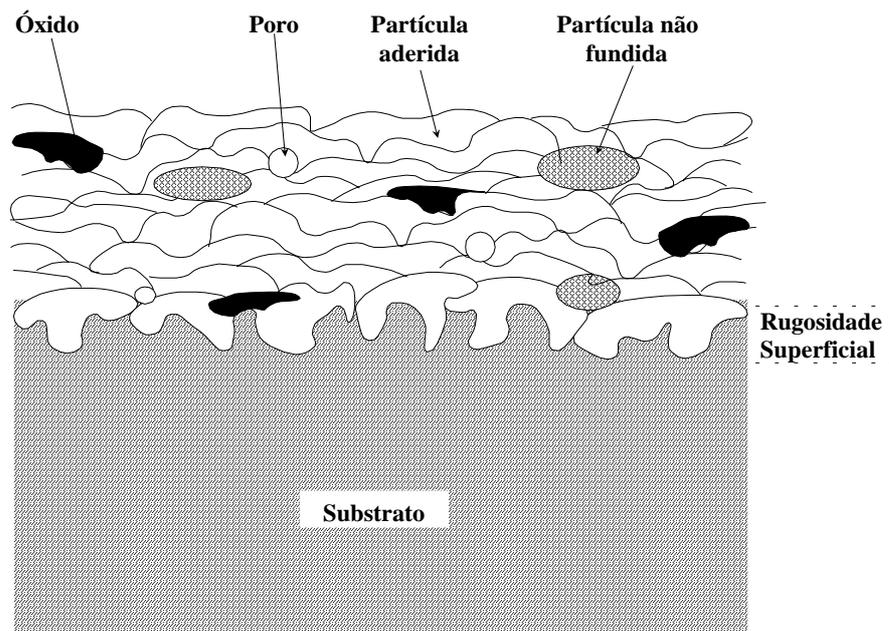


Figura 1 Desenho esquemático da seção transversal típica de um revestimento aspergido termicamente.

Tabela II - Temperatura das fontes de calor

Fonte	Temperatura °C
Propano + oxigênio	2640
Gás natural + oxigênio	2735
Hidrogênio + oxigênio	2690
Acetileno + oxigênio	3100
Arco e plasma	2200 - 8300

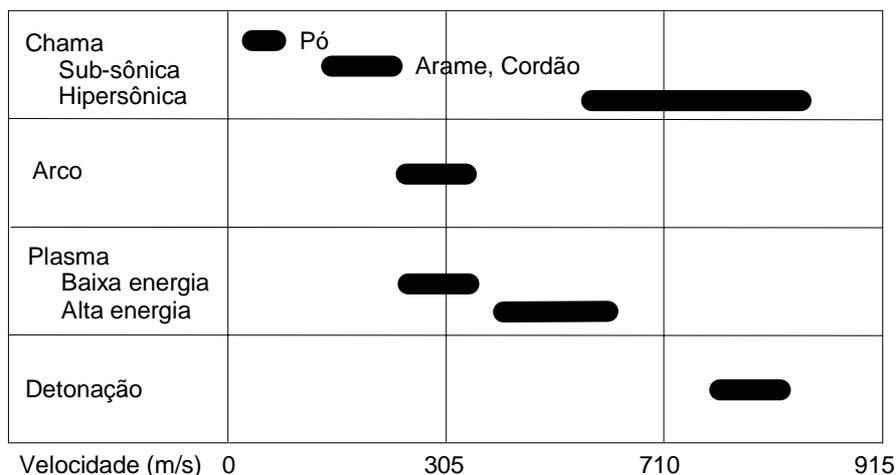


Figura 2 Velocidade de impacto média das partículas.

2. Processos

2.1. Processos por Combustão

Este grupo de processos utiliza o calor gerado pela queima de um gás combustível. Qualquer substância que se funde e não sublima a temperaturas inferiores a cerca de 2760°C pode ser aspergido por estes processos. Os materiais aplicados podem ser metais e ligas na forma de arame, cordão ou pó e cerâmicos, na forma de vareta, cordão ou pó.

2.1.1. Arames e Varetas

O equipamento usado para aplicação de arames e varetas é similar, como mostrado na figura 3. A seção transversal típica de uma tocha utilizada para aspersão com estes processos é mostrada na figura 4.

O material a ser aspergido é inserido por roletes alimentadores na parte posterior da tocha. Estes podem ser tracionados por um motor elétrico ou pneumático, ou por uma turbina a ar. O material é alimentado através de um bocal, onde é fundido por uma chama de gás combustível, concêntrica a este.

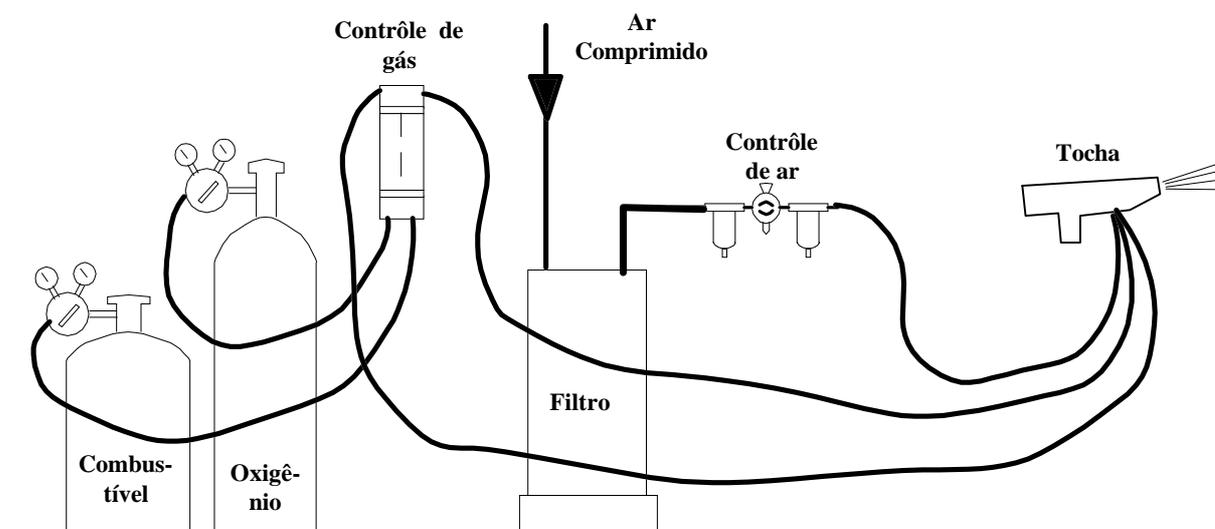


Figura 3 Equipamento típico para aspersão térmica por combustão (esquemático).

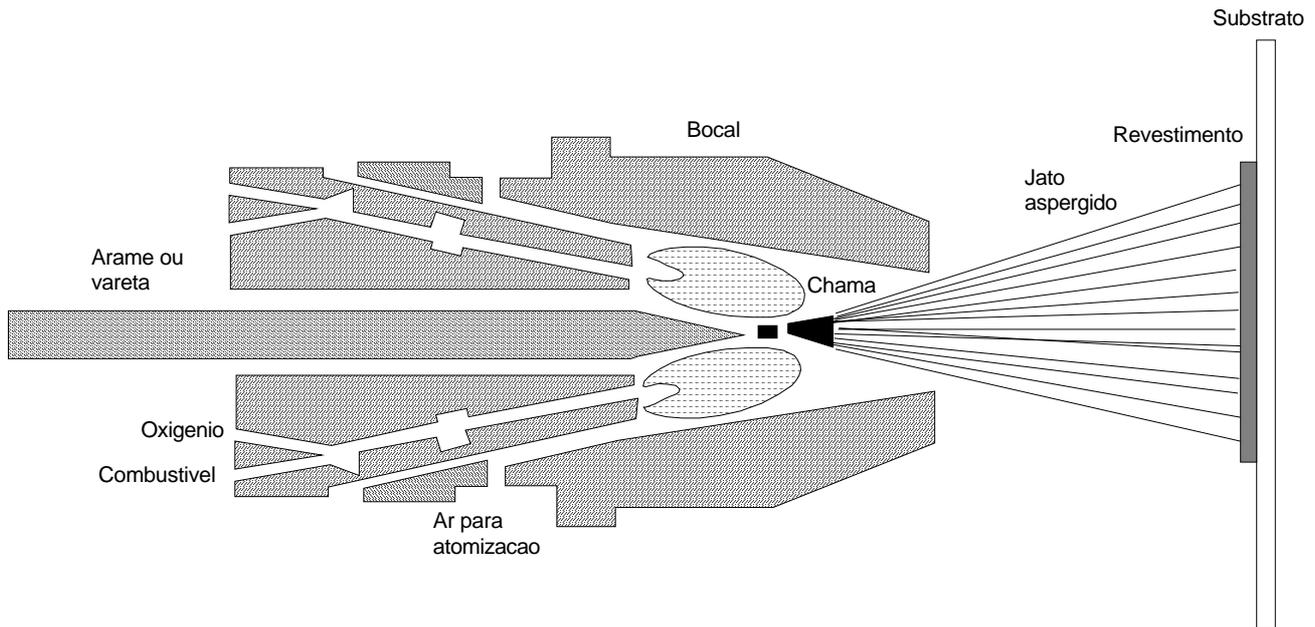


Figura 4 Seção transversal de uma tocha para aspersão por chama (esquemática).

Os gases combustíveis usados juntamente com o oxigênio foram mostrados na tabela II. O acetileno é o mais largamente usado por sua maior temperatura de chama. Entretanto, em certos casos, temperaturas mais baixas são usadas com vantagens econômicas. A chama é usada apenas para fundir o material. Para se obter aspersão, um jato de gás, em geral ar comprimido, é usado para pulverizar o material e acelerar as partículas em direção ao substrato. Em aplicações especiais, um gás inerte pode ser usado.

Os roletes de alimentação devem ser escolhidos e apropriados à forma de material a ser alimentado, isto é, se arame, vareta ou cordão.

2.1.2. Pó

Tochas para aspersão a chama com pó são mais leves e mais compactas que tochas para outros processos. Devido às menores temperaturas e velocidades alcançadas pelas partículas, os revestimentos obtidos têm, em geral, menor resistência adesiva ao substrato, menor resistência coesiva entre as lamelas e maior porosidade, quando comparados com os depositados por outros processos de aspersão térmica.

O material a ser aspergido pode ser um metal puro, uma liga metálica, um compósito, um carboneto,

um cerâmico, um cermet ou combinações destes. O processo é geralmente usado para aplicação de ligas metálicas auto-fluxadas, que devem ser fundidas após a aspersão. Estes materiais contêm boro e silício que servem como agentes fluxantes e minimizam a oxidação. Sua fusão e/ou ligação metalúrgica a um substrato metálico é obtida aquecendo-se o revestimento até sua temperatura de fusão, que, em geral, é inferior a 1040°C e pode ser feita com o uso de qualquer fonte de calor, como uma chama, uma bobina de indução ou um forno. Um arco elétrico também pode ser usado, mas com certo cuidado, para evitar ou minimizar a fusão do substrato.

O pó para aspersão é armazenado num recipiente que pode ser parte integrante da tocha ou ser acoplado a ela. Uma pequena quantidade de gás é desviada para arrastar o pó até o jato da mistura oxigênio/combustível em chama, quando ele é fundido e acelerado em direção ao substrato. Um corte transversal de uma tocha típica para aspersão de pó por chama é mostrado na figura 5.

Variações do processo de aspersão térmica de pó a chama incluem: gás comprimido para alimentação do pó na chama, jatos adicionais de ar comprimido para acelerar as partículas fundidas, alimentador de pó remoto, com arraste do pó para a tocha por um tubo pressurizado com gás inerte e dispositivos

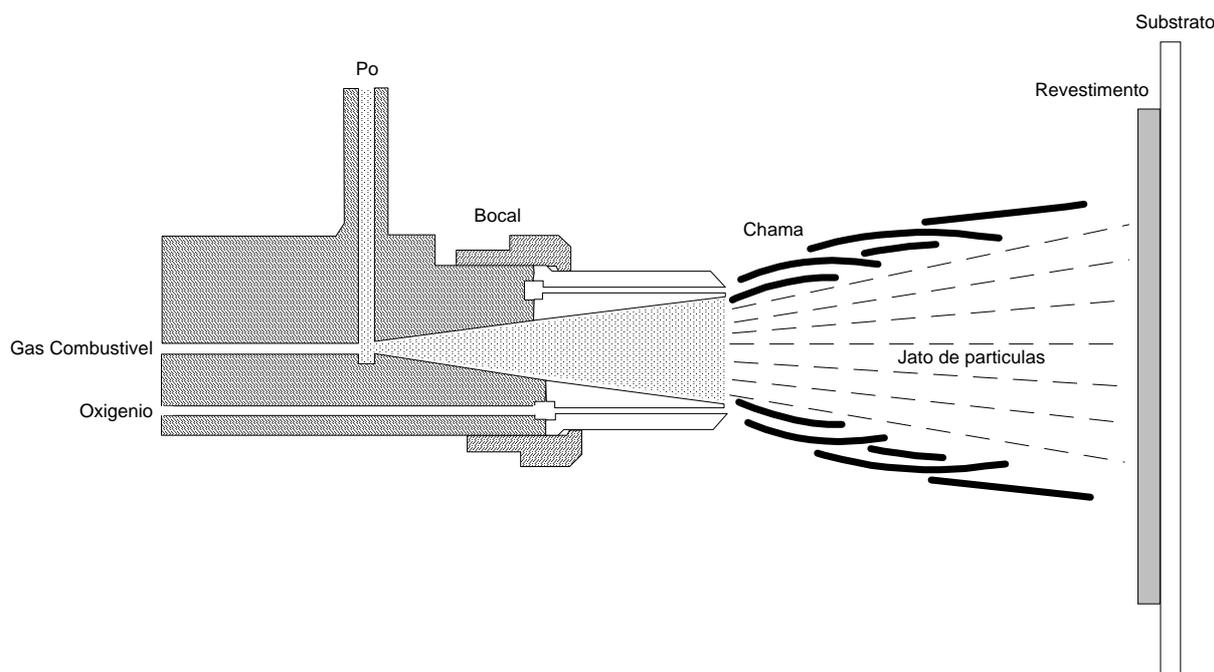


Figura 5 Corte transversal de uma tocha para aspersão térmica de pó a chama (esquemático).

para aceleração a alta velocidade à pressão atmosférica. Esses refinamentos tendem a aumentar a taxa de alimentação de pó e, às vezes, a velocidade das partículas fundidas, que aumentam a resistência adesiva e a densidade do revestimento aspergido.

Revestimentos fundidos pós aspersão são densos e relativamente isentos de porosidade. A composição da liga pode levar a revestimentos com níveis de dureza Rockwell C superiores a 50. A espessura destes revestimentos é limitada àquelas faixas que podem ser aquecidas até a temperatura de fusão sem descamação. O uso de ligas auto-fluxantes é limitado a aplicações em que os efeitos da fusão e de distorção podem ser tolerados. Revestimentos mais espessos de metais dissimilares podem ser aplicados em passes múltiplos. A superfície que vai receber o segundo revestimento deve ser limpa de todos os resíduos de óxido após cada etapa de fusão.

Em todos os processos de aspersão térmica, a taxa de alimentação de pó afeta a estrutura e a eficiência de deposição do revestimento. Se o material não é aquecido adequadamente a eficiência de deposição cai rapidamente e o revestimento conterá partículas não fundidas retidas. Se a taxa de alimentação de pó for muito baixa, uma certa quantidade de pó pode se volatilizar, resultando em deterioração do revestimento e elevação de custos. Os

alimentadores de pó são compostos por um recipiente e um sistema de medição que regula a taxa de alimentação de material no dispositivo transportador por gás.

2.2. Detonação

A tocha de detonação é diferente de outros equipamentos de aspersão por combustão. Ela utiliza a energia de explosões de uma mistura oxigênio-acetileno, ao invés de uma chama estacionária, para impulsionar o pó até a superfície do substrato. O depósito resultante é extremamente duro, denso, fortemente ligado ao substrato.

Uma tocha de detonação, mostrada na figura 6, consiste basicamente de um tubo comprido, no qual é introduzida uma mistura de gás combustível, oxigênio e pó. Quando é feita a ignição da mistura, uma onda de choque controlada aquece e acelera as partículas de pó, cuja velocidade de saída é de 760 m/s aproximadamente. Após cada injeção de mistura, uma certa quantidade de nitrogênio é introduzida no tubo para purga deste. Ocorrem várias detonações por segundo, gerando um ruído da ordem de 150 dB, sendo muitas vezes utilizadas instalações especiais com isolamento acústico para estas operações.

Dentro do tubo, temperaturas superiores a 3300°C são atingidas, enquanto a temperatura do substrato deve ser mantida abaixo dos 150°C, usando-se dispositivos de resfriamento, se for o caso.

A espessura dos revestimentos geralmente situa-se entre 0,05 e 0,5mm. A operação é normalmente mecanizada e às vezes remotamente controlada. Excelente acabamento pode ser obtido, devido à baixa porosidade do revestimento.

2.3. Processos Elétricos

2.3.1. Arco Elétrico

No processo de aspersão a arco elétrico, dois arames eletrodos consumíveis são alimentados de forma a se encontrar em um ponto à frente de um jato de gás, que serve para atomização. Uma diferença de potencial de 18 a 40V é estabelecida entre os arames, produzindo um arco elétrico que funde a ponta destes. O jato de gás atomizante (em geral ar comprimido) destaca o material fundido, produzindo um jato de gotículas fundidas que é dirigido ao substrato. A figura 7 mostra um desenho esquemático de uma tocha para aspersão a arco.

O equipamento básico para este processo consiste de uma fonte de corrente contínua tipo tensão constante, alimentadores de arame do tipo velocidade constante, tocha de aspersão e um sistema de fornecimento de gás comprimido controlável. Os arames utilizados são, em geral, de grande diâmetro, da ordem de 5mm. Este processo experimentou um avanço recente com o desenvolvimento de arames tubulares com enchimento metálico.

A temperatura do arco é consideravelmente maior que o ponto de fusão do material aspergido, de modo que algum superaquecimento e volatilização podem ocorrer, particularmente na aplicação de zinco e alumínio. A alta temperatura das partículas pode produzir zonas de reação química ou difusão ou ambas, após o impacto com o substrato. Estas interações são similares a pequenas soldas a ponto e conferem excelente resistência de adesão e coesão ao revestimento. Este processo apresenta taxas de deposição mais altas que outros processo de aspersão. Os fatores que influenciam esta taxa são a corrente e a velocidade de alimentação de arame, que dependem do equipamento usado.

O comprimento do arco e o tamanho das gotículas tendem a aumentar com a elevação da diferença de potencial entre os arames. Esta deve ser mantida em valores mínimos, compatíveis com a estabilidade do arco, para se obter revestimentos densos e de melhor acabamento.

2.3.2. Arco Plasma não Transferido

O desenvolvimento de turbinas e motores de foguetes tem exigido bom desempenho de materiais de engenharia em condições cada vez mais severas. Para satisfazer estas exigências, óxidos e carbonetos têm sido considerados, devendo ser aplicados por processos de aspersão térmica de alta temperatura. O processo plasma tem atendido esta necessidade e levou ao desenvolvimento de uma nova família de materiais e técnicas de aplicação para uma ampla faixa de aplicações industriais.

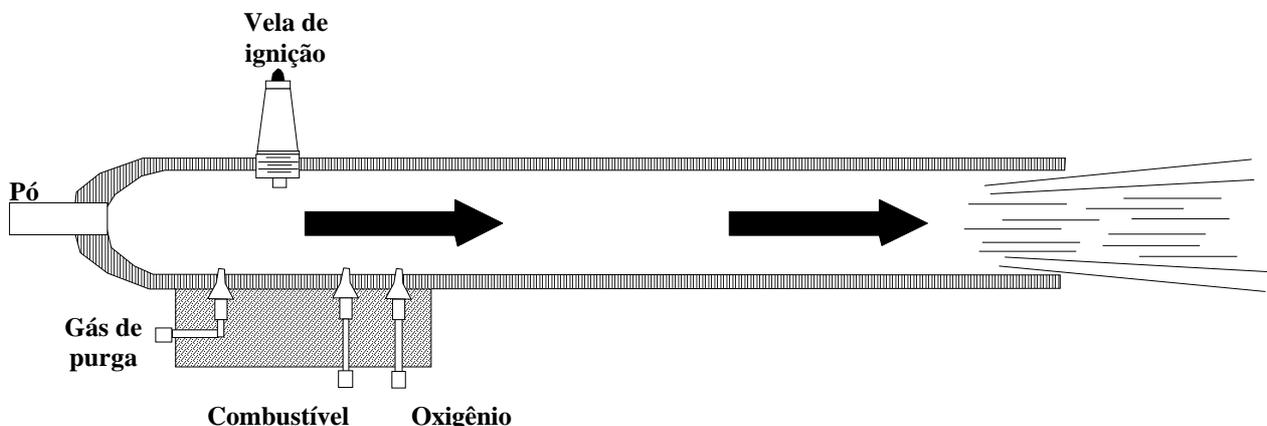


Figura 6 Tocha de detonação (Esquemática).

Na aspersão a plasma, o material é aplicado a partir de um pó. Aplicação a partir de arames tem sido desenvolvida mais recentemente. Neste processo, um gás ou mistura de gases passa 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.

O pó é alimentado no plasma, fundido e acelerado em direção ao substrato por um jato de alta velocidade. A energia, temperatura e velocidade do jato de plasma são controlados pelo tipo de bocal constritor, intensidade da corrente elétrica, composição e vazão do gás de plasma. Em geral, nitrogênio ou argônio são usados como gás de plasma, podendo conter adições de hidrogênio ou hélio para aumentar sua potência e velocidade.

O equipamento básico para a aspersão a plasma, mostrado na figura 8, consiste de uma fonte de corrente contínua constante, alimentador de pó, fonte de gás e um sistema de controle, que permite ajustar os parâmetros de operação (corrente, vazões de gás, fluxo de água para refrigeração) e faz a sincronia de todo o sistema.

2.3.3. Arco Plasma Transferido

Neste caso, o processo é uma combinação de aspersão térmica e soldagem. O substrato deve ser condutor e faz parte do circuito do arco elétrico que gera o plasma. O material aspergido se mistura com o material da poça de fusão formada no substrato, isto é, ocorre diluição. O equipamento usado é similar ao necessário para plasma não transferido, com exceção da tocha.

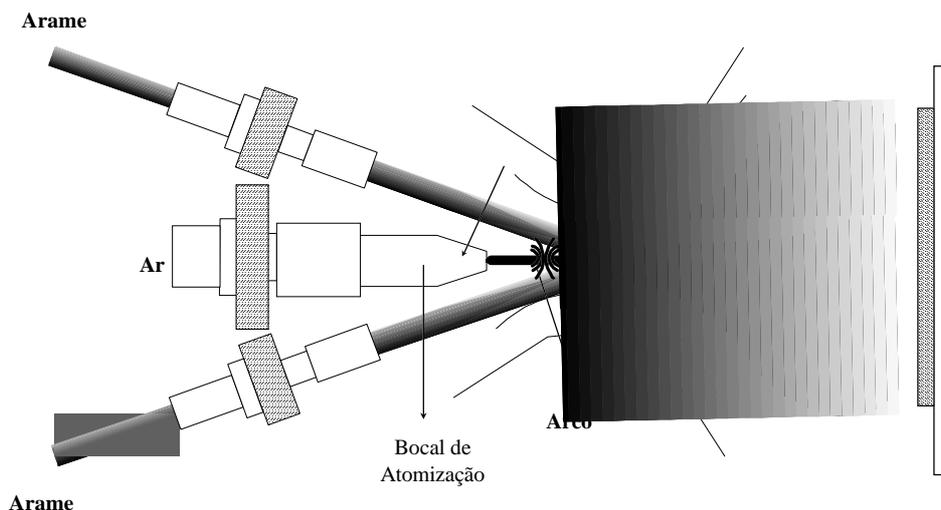


Figura 7 Tocha para aspersão a arco elétrico (esquemática).

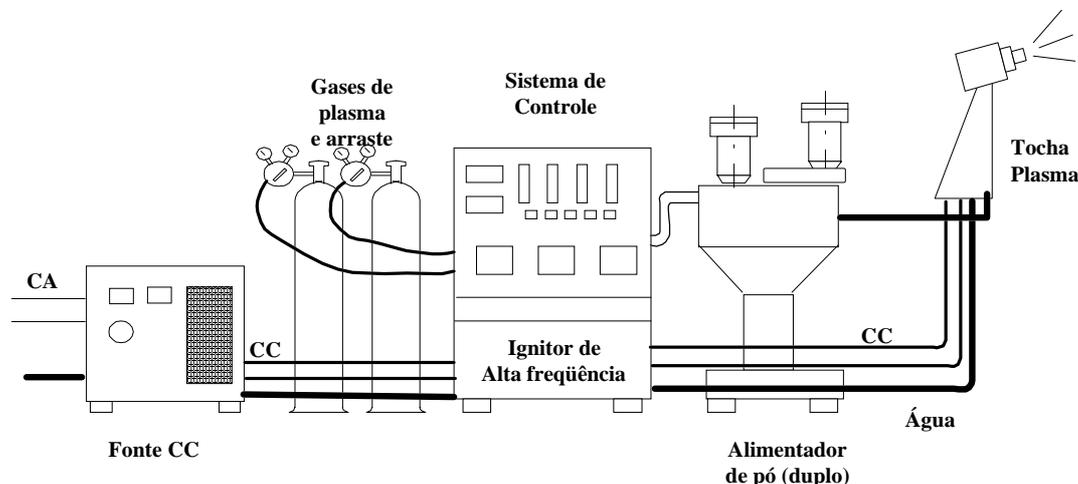


Figura 8 Sistema para aspersão térmica a plasma (esquemático).

A ligação do revestimento ao substrato é essencialmente metalúrgica e as espessuras utilizadas são em geral maiores que em outros processos de aspersão térmica. O depósito é denso, uniforme e com bom acabamento. A operação é geralmente mecanizada e com boa reprodutibilidade. Entretanto, a combinação de substratos e materiais aplicáveis é mais limitada.

A Tabela III apresenta uma comparação entre as principais características dos diversos processos de aspersão térmica, segundo THORPE (1993).

3. Preparação da Superfície

3.1. Introdução

A preparação da superfície é a etapa mais crítica da operação de aspersão térmica. A qualidade da adesão do revestimento está diretamente relacionada com a limpeza e a rugosidade da superfície do substrato. A obediência rigorosa a procedimentos padronizados de preparação da superfície é necessária para garantir o sucesso na aplicação de revestimentos por aspersão térmica. O tipo de material do revestimento e do substrato são os fatores principais na determinação do processo e qualidade da preparação necessária da superfície para se obter adesão suficiente a uma dada aplicação.

Em partes sujeitas a fortes tensões mecânicas, uma inspeção prévia à operação de revestimento é necessária, para a detecção de falhas no metal base, que é feita normalmente através de ensaios não destrutivos. Falhas estruturais no metal base indu-

zirão falhas similares no revestimento. Trincas no substrato não podem ser reparadas por aspersão térmica e revestimentos depositados por esta técnica não adicionam resistência mecânica ao substrato.

3.2. Limpeza e Manuseio

O primeiro passo na preparação de um substrato para aspersão térmica é a retirada de todos os contaminantes superficiais, tais como poeira, óleo, graxa e pintura. O calor do processo de aspersão não remove contaminação e esta inibe a adesão do revestimento. Depois que todos os contaminantes forem eliminados, a limpeza deve ser mantida até que o ciclo de revestimento se complete. As peças devem ser protegidas de partículas transportadas pelo ar e marcas de dedos, bem como ser manuseadas com ferramentas e material limpo.

3.2.1. Desengraxe com Vapor

Desengraxe a quente com vapor é um método comum, econômico e eficiente na remoção de contaminantes orgânicos. As peças devem ser lavadas por 15 a 30 minutos para remoção de óleo dos interstícios e poros da superfície. Materiais porosos como fundidos em molde de areia e ferros fundidos cinzentos devem ser lavados por períodos de tempo maiores. Se as peças forem muito grandes para desengraxe com vapor, lavagem a vapor, imersão em solução detergente a quente ou limpeza manual com um detergente sem gordura podem ser usadas alternativamente. Resíduos devem ser removidos mecanicamente.

Tabela III - Comparação de características de processos de aspersão térmica.(*)

Característica	Vazão de gases (m ³ /h)	Temperatura média (°C)	Atmosfera em torno da gotícula	Velocidade de impacto (m/s)	Aderência relativa (1 a 10)	Coessão interlamelar	Teor de óxidos (%)	Custo relativo (1 a 10)	Taxa de deposição máxima (kg/h)	Potência (kW)	Energia para fusão (kW/kg)
Chama (Pó)	11	2200	CO, CO ₂ , H ₂ O	30	3	Baixa	6	3	7	25-75	11-22
Chama (Arame)	71	2800	N ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O	180	4	Média	4	3	9	50-100	11-22
Arco (Arame)	71	5500	N ₂ , O ₂	240	6	Alta	0,5-3	1	16	4-6	0,2-0,4
Plasma	4,2	5500	N ₂ , Ar, H ₂ , O ₂	240	6	Alta	0,5-1	5	5	30-80	13-22
Detonação	11	3900	N ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O	910	8	Muito Alta	0,1	10	1	100-270	220
HVOF	28- 57	3100	N ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O	610-1060	8	Muito Alta	0,2	5	14	100-270	22-200
Plasma de alta energia	17-28	8300	N ₂ , Ar, H ₂ , O ₂	240-1220	8	Muito Alta	0,1	4	23	100-250	9-13
Plasma a vácuo	8,4	8300	Ar, He	240-610	9	Muito Alta	ppm	10	10	50-100	11-22

(*) Thorpe, M. L. Thermal Spray - Industry in transition. Advanced materials & processes, v.143, n.5, p.50-61. 1993.

Solventes desengordurantes comuns como o percloroetileno, o tricloroetileno e o tricloroetano são normalmente usados por razões de segurança, na faixa de temperaturas necessárias à limpeza. A maioria dos solventes com hidrocarbonetos é perigosa e as instruções dos fabricantes quanto ao uso e armazenagem devem ser rigorosamente seguidas.

A reciclagem (ou recuperação) de solventes deve ser pesquisada com o fornecedor. Solventes clorados deixam resíduos que podem ser removidos com lavagem por imersão ou esfregamento com álcool isopropílico ou metilil cetona (MEK).

O uso de solventes clorados em titânio e suas ligas é proibido, uma vez que o cloro pode induzir trincas nestes materiais. Métodos de limpeza alternativos como lavagem em meio alcalino, jateamento com vapor, decapagem, lavagem com solventes inflamáveis ou mais de um desses métodos podem ser necessário.

3.2.2. Jateamento Úmido

Jateamento com vapor, jateamento com abrasivo úmido ou polimento por jateamento de líquido com abrasivo usam uma suspensão de um meio abrasivo projetada por um jato de ar contra a superfície. A limpeza é feita em recinto fechado, similar a uma cabine de jateamento abrasivo, usando como meio abrasivo o óxido de alumínio, "novaculite" ou farinha de granada. A granulometria de muitos abrasivos se situa na faixa de 200 a 1200 mesh e estes são misturados com água numa proporção de 0,6 kg/l. Aditivos podem ser usados, como inibidores de ferrugem e compostos anti-solidificantes. As peças devem ser cuidadosamente lavadas após a limpeza.

Jateamento pode ser usado com um dos seguintes propósitos: remover pequenas rebarbas, remover produtos de corrosão, remover revestimentos e camadas superficiais anteriores e gerar rugosidades superficiais para aspensão a plasma.

3.2.3. Decapagem Ácida

Decapagem ou ataque com ácido diluído é um procedimento de limpeza mais drástico que o jateamento. A decapagem deve ser realizada quando a peça estiver na etapa final de usinagem, minimizando o risco de retenção de ácido ou e sub-

seqüente ataque intergranular. Os procedimentos de decapagem requerem imersão total da peça na solução ácida. O tempo de imersão depende da condição da superfície, da quantidade de remoção desejada ou de ambos. Depois da decapagem, lavagem em água quente, imersão em solução alcalina ou limpeza com jato de vapor ou água quente são geralmente usados.

Superfícies contaminadas com ácido podem ser neutralizadas por escovamento com uma solução de bicarbonato de sódio ou imersão num meio alcalino quente. De modo similar, superfícies contaminadas por agentes básicos podem ser neutralizadas por escovamento com solução de ácido hidrocloreto a 1% ou de ácido acético a 10%. Após esta etapa, a superfície deve ser lavada com água limpa fria e secada ao ar ou com jato de ar.

3.2.4. Aquecimento em Forno

Vários elementos de máquinas fabricados em materiais porosos, como fundidos em molde de areia, podem absorver consideráveis quantidades de óleo, que pode escapar durante a operação de aspensão. Conjuntos soldados inspecionados por líquidos penetrantes fluorescentes estão particularmente sujeitos à absorção de contaminantes. O aquecimento em forno em torno de 320°C por 4 horas seca o óleo e previne problemas de contaminação.

3.2.5. Limpeza Ultrasônica

Limpeza ultrasônica pode ser usada quando os contaminantes estão alojados em áreas confinadas. O equipamento consiste de um tanque que contém a solução de limpeza e uma fonte para produzir vibração ultrasônica dentro deste. A seleção da solução de limpeza depende do contaminante a ser eliminado. Solventes inflamáveis ou muito voláteis devem ser evitados em operações longas, devido ao aquecimento produzido durante o processo.

3.2.6. Jateamento Seco

Jateamento abrasivo a seco é um método efetivo para remoção de depósitos estufados ou salientes, carepa ou óxidos. O jateamento abrasivo é conseguido dirigindo-se um jato de ar comprimido contendo partículas abrasivas, através de um bocal, contra a superfície do substrato. A operação de jateamento deve

ser feita em outro equipamento que não o designado para preparação do substrato para aspersão. Isto previne a contaminação do abrasivo. A seleção do tipo e tamanho do abrasivo deve ser cuidadosa.

Painéis de folha metálica, estampados e soldados são mais difíceis de preparar que peças usinadas. Chapas do estoque são geralmente identificadas por pintura com o nome do fabricante, tipo de material, número da corrida. A superfície contém, freqüentemente, carepa proveniente da laminação ou tratamento térmico, que deve ser removida. Processos subsequentes de fabricação usualmente adicionam ou criam oxidação que também deve ser eliminada.

3.2.7. Escovamento

Escovamento é usado quando somente uma limpeza localizada é necessária. Pequenas escovas rotativas acionadas por ferramentas potentes limpam a superfície por roçamento.

4. Criação de Rugosidades

4.1. Generalidades

Após a limpeza, vários métodos são usados para produzir uma superfície mais adequada para a aderência do revestimento. Os principais são: jateamento abrasivo, "macroenrugamento" (macroroughening) e aplicação de um revestimento de ligação. Combinações destes métodos são também empregadas, incluindo jateamento abrasivo com subsequente aplicação de um revestimento de ligação e usinagem seguida de jateamento abrasivo.

A obtenção de uma rugosidade adequada é tão importante quanto a limpeza. Durante a aspersão, as partículas fundidas ou semi-fundidas formam "bolachas" quando se chocam com a superfície do substrato. Estas, à medida que se resfriam e se contraem, precisam aderir à uma superfície que favoreça o ancoramento mecânico.

A geração de uma superfície rugosa é usada para aumentar a aderência e a coesão entre as partículas do revestimento por: geração de tensões superficiais de contração, intertravamento de camadas, aumento da área de interação e descontaminação da superfície.

O grau de enrugamento necessário para produzir um revestimento resistente e adequado depende do material aplicado, do processo e das condições de serviço da peça final.

4.2. Medição da Rugosidade

A medida da rugosidade pode ser feita por diferentes técnicas e diferentes parâmetros. A norma brasileira ABNT NBR 6405 (1988) define alguns parâmetros desta medição utilizando-se um sistema de apalpamento através de dispositivos eletromecânicos, tomando-se como referência uma linha média, chamado sistema M:

- A linha média é definida como uma linha paralela à superfície, dentro do percurso de medição l_m , de modo que a soma das áreas superiores seja exatamente igual à das áreas inferiores;
- o percurso inicial l_v é a extensão da primeira parte do trecho apalpado, projetado sobre a linha média, não utilizado na avaliação. Este trecho tem por finalidade permitir o amortecimento das oscilações elétricas e mecânicas iniciais do sistema de medição e a centragem do perfil de rugosidade;
- o percurso de medição l_m é a extensão do trecho útil do perfil de rugosidade, projetado sobre a linha média, usado diretamente na avaliação;
- o comprimento de amostragem l_e é tomado como sendo um quinto do percurso de medição e deve conter todos os elementos representativos da rugosidade e eliminar aqueles inerentes ao perfil, daí ser de grande importância a sua escolha;
- o percurso final l_n é a extensão da última parte do trecho apalpado, projetado sobre a linha média, não utilizado na avaliação. Este trecho tem por finalidade permitir o amortecimento das oscilações elétricas e mecânicas finais do sistema de medição;
- o percurso de apalpamento l_t é a soma dos percursos inicial, de medição e final;
- a rugosidade média R_a é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento dos pontos do perfil de rugosidade, em relação à linha média, dentro do percurso de medição;
- a rugosidade média R_z é a média aritmética dos 5 valores de rugosidade parcial Z_p , definida como a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento acima e abaixo da linha média, dentro de um comprimento de amostragem;

- a rugosidade máxima $R_{m\acute{a}x}$ é o maior valor de rugosidade parcial Z_i que se apresenta dentro do percurso de medição.

A Tabela IV apresenta os valores recomendados pela ABNT para medida de R_a em perfis aperiódicos e a figura 9 ilustra os conceitos acima definidos.

4.3. Jateamento Abrasivo

O jateamento abrasivo é a técnica mais comumente usada para se obter uma rugosidade adequada à aspersão térmica. A superfície a ser revestida é condicionada pelo choque de partículas abrasivas. A seleção do abrasivo a ser usado deve ser feita com cuidado e diversos fatores devem ser considerados: dureza e espessura do substrato, tamanho da peça,

tipo de revestimento, rugosidade requerida, condições de serviço, taxa de produção necessária, tamanho da partícula abrasiva, pressão de ar, tamanho do bocal de jateamento e ciclo de vida.

Os efeitos do jateamento abrasivo são dependentes do tipo e tamanho do abrasivo usado. Partículas pontudas, duras e anguladas produzem melhores resultados. Partículas esféricas ou arredondadas não devem ser usadas. Os abrasivos devem estar secos, limpos e livres de contaminação.

Diversos tipos de abrasivos estão disponíveis comercialmente. Os mais comuns são: óxido de alumínio, ferro de coquilha, aço angulado, carbetto de silício e abrasivo de granada. As tabelas V e VI resumem algumas características e usos dos abrasivos para jateamento.

Tabela IV - Comprimento de amostragem para a determinação de R_a em perfis aperiódicos (NBR 6405)

Rugosidade - R_a (μm)	Comp. de Amostragem l_e (mm)	Percurso de Medição l_m (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

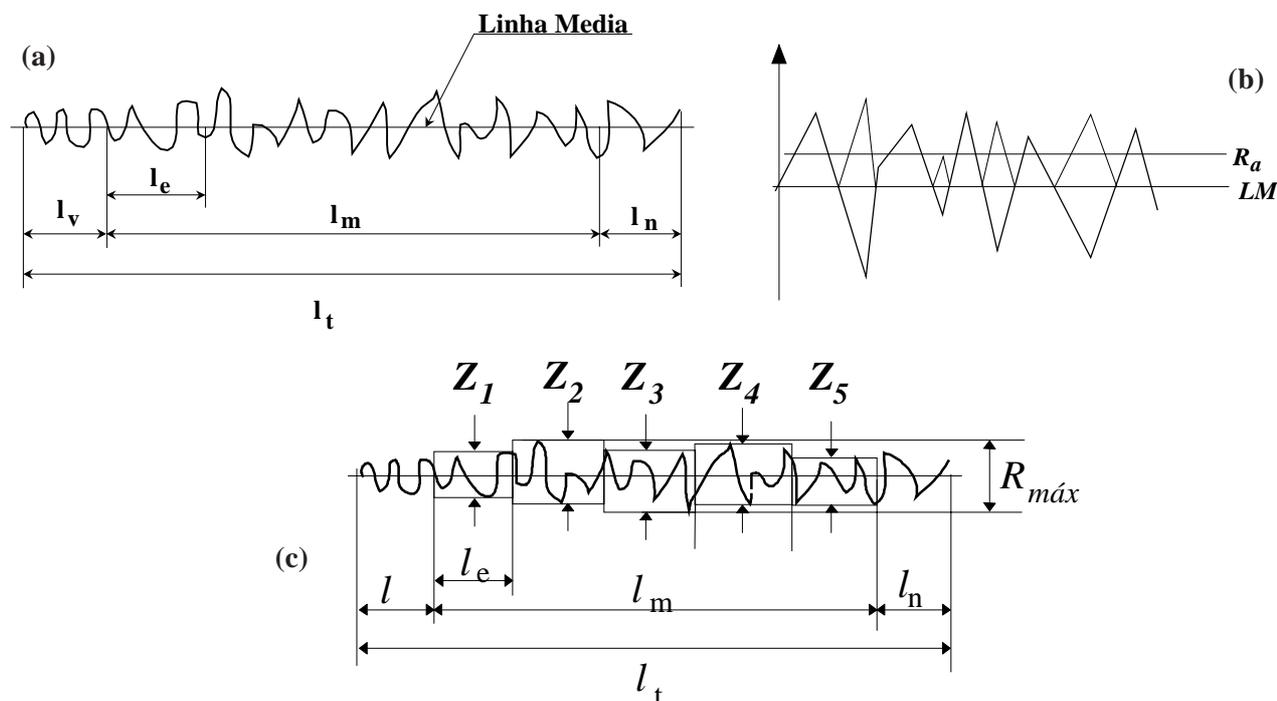


Figura 9 Definições de parâmetros associados à medida de rugosidade. (a) linha média, l_v , l_e , l_m , l_n , e l_t ; (b) linha média e R_a e (c) Z_i e $R_{m\acute{a}x}$. (Adaptado de NOVASKY, 1994).

Tabela V - Características de abrasivos usados para jateamento anterior à aspersão térmica.

Meio abrasivo	Natural ou fabricado	Principal componente químico	Forma	Densidade (g/cc)	Perda % (*)	Dureza Rockwell 1C
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
Granada	Natural	Ferro sílica	Cúbico	4,09	46	54
Escória mineral	Fabricado	Sílica, Al, Fe	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 Si	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.

Tabela VI - Abrasivos recomendados para uso em jateamento

Serviço Recomendado(*)	Al	Sílica	Escória	Abras. mineral natural	Abras. Sintéticos	Abras. Especiais	Fe coquilhado	Abras. Reciclado	Aço
Limpeza em geral (c/reutilização)	C	C	C	C	P		P	C	
Limpeza em geral (s/reutilização)		P	C						
Jateamento pré-aspersão	P	C	C	C	C		P	C	C
Jateamento c/ rigor dimensional						C			
Jateamento em cabines e salas fechadas	P	C	C	C		C	P	C	

C - Usado comumente, P - preferido para aplicação em aspersão térmica

A dureza do substrato é um fator importante a ser considerado. Óxidos refratários pontudos, com arestas cortantes, podem ficar incrustados na superfície de materiais macios, como o alumínio. Ferro de coquilha, que arredonda ao invés de fraturar durante o impacto, é melhor para limpeza de substratos com dureza inferior a 40-45 Rockwell C. Abrasivo de ferro coquilhado cria, em geral, maiores tensões no substrato que o óxido de alumínio. Por essa razão, ele não deve ser usado em peças finas, que podem empenar pelo jateamento.

Óxido de alumínio deve ser usado em substratos de dureza elevada, como os aços martensíticos. Quando usado em substratos macios, jateamento somente com ar pode ser necessário após o jateamento abrasivo, para remover partículas retidas.

Carbeto de silício tem uma tendência ainda mais elevada a ficar incrustado na superfície e se quebra mais facilmente que o óxido de alumínio.

Como a rugosidade final do substrato depende do tamanho do abrasivo usado, estes são fornecidos em diferentes tamanhos. Partículas menores permitem a preparação de áreas maiores por hora de trabalho. Partículas abrasivas maiores resultam em remoção mais rápida de material e maior rugosidade da superfície. A Tabela VII mostra a distribuição granulométrica de partículas com diferentes tamanhos nominais e a Tabela VIII mostra alguns tamanhos de peneiras padrão. O tamanho recomendado de partículas é entre 16 e 60 para preparação de substratos metálicos e entre 60 e 100 para a maioria dos plásticos.

Para revestimentos muito finos, particularmente quando depositados em substratos de pouca espessura, partículas finas (25 a 120) devem ser usadas. Abrasivos mais grosseiros (18 a 25) produzem acabamentos mais rugosos e são usados para revestimentos de maior espessura (> 0,25mm), resultam também em maior aderência.

Tabela VI - Distribuição granulométrica das partículas em função de seus tamanhos nominais

Peneira N°	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

Tabela VIII - Dimensões padrão de peneiras

Designação Padrão da peneira (mm)	Abertura nominal (pol)	Varição 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

Tabela VIII - Dimensões padrão de peneiras (continuação)

Designação Padrão da peneira (mm)	Abertura nominal (pol)	Variação permitida (mm)	Abertura média máxima (mm)	Abertura individual máxima (mm)	Diâmetro nominal do arame (mm)
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
2,80	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	± 0,040	1,080	1,135	0,580
0,85	0.0331	35 µm	925 µm	970	0,510
0,71	0.0278	30 µm	775 µm	815	0,450
0,60	0.0234	25 µm	660 µm	695	0,390
0,50	0.0197	20 µm	550 µm	585	0,340
0,425	0.0165	19 µm	471 µm	502	0,290
0,355	0.0139	16 µm	396 µm	425	0,247
0,300	0.0117	14 µm	337 µm	363	0,215
0,250	0.0098	12 µm	283 µm	306	0,180
0,212	0.0083	10 µm	242 µm	263	0,152
0,180	0.0070	9 µm	207 µm	227	0,131
0,150	0.0059	8 µm	174 µm	192	0,110
0,125	0.0049	7 µm	147 µm	163	0,091
0,106	0.0041	6 µm	126 µm	141	0,076
0,090	0.0035	5 µm	108 µm	122	0,064
0,075	0.0029	5 µm	91 µm	103	0,053
0,063	0.0025	4 µm	77 µm	89	0,044
0,053	0.0021	4 µm	66 µm	76	0,037
0,045	0.0017	3 µm	57 µm	66	0,030
0,038	0.0015	3 µm	48 µm	57	0,025

A aparência de uma superfície com acabamento adequado à operação de aspersão térmica é uma de cor cinza metálico uniforme, com aparência rugosa, isenta de óleo, graxa, poeira, carepa ferrugem, óxidos ou produtos de corrosão, pintura e qualquer outro material estranho.

A rugosidade (Ra) adequada para a maioria dos revestimentos por aspersão térmica é de 2,5 a 13 μm . Para algumas aplicações críticas, especialmente peças metálicas de pequena espessura, pode ser necessária uma rugosidade de 1,3 μm . Peças plásticas revestidas com materiais de baixo ponto de fusão, como o zinco, a rugosidade mínima deve ser de 6 μm .

A resistência de adesão em geral aumenta com o aumento da rugosidade até 10 μm , continuando a aumentar a taxas menores para rugosidades acima deste valor. A melhor resistência de adesão está associada a dimensões de rugosidade da ordem de $\frac{3}{4}$ do diâmetro das partículas usadas.

Além do tipo e tamanho do abrasivo, outras variáveis importantes na obtenção de uma superfície com rugosidade adequada são: pressão de ar, ângulo de jateamento, distância e tempo. A Tabela IX mostra algumas combinações típicas.

Todas as áreas do substrato que puderem ser danificadas pela operação de jateamento devem ser protegidas com uma cobertura adequada. Poeira e

material abrasivo aderidos à superfície do substrato devem ser removidos por jato de ar antes da aspersão propriamente dita.

As pressões de ar para jateamento estão na faixa de 30 a 100 psi (34 a 88 kg/cm^2), dependendo do material do substrato, do acabamento superficial desejado da vazão, peso e tamanho do abrasivo, do tipo de equipamento e de bocal usados. Baixas pressões de ar e abrasivo fino ou macio são usados para substratos como o alumínio, cobre e suas ligas e plásticos, para minimizar a incrustação de partículas. Pressões de ar elevadas, além de provocar deterioração rápida do abrasivo, produz tensões de compressão que podem distorcer substratos finos.

Para equipamentos de jateamento por pressão, as seguintes pressões de ar no bocal devem ser usadas:

- (1) Com óxido de alumínio, carbetto de silício ou escória: 50 psi (345 kPa) no mínimo e 60 psi (414 kPa) no máximo,
- (2) Com areia, granada ou ferro coquilhado: 75 psi (517 kPa) no mínimo.

Estas não são as pressões no reservatório do compressor, mas no bocal de jateamento, medidas com um medidor de ponteiro.

Se jateadoras de sucção estiverem sendo usadas, as seguintes pressões máximas de ar no bocal devem ser usadas:

Tabela IX - Condições usuais de jateamento para obtenção de rugosidade adequada.

Tamanho do abrasivo (mesh)	Material abrasivo	Pressão de ar		Diâmetro do bocal		Tipo de Equipamento.	Substrato	Rugosidade Ra	
		psi	kPa	pol	mm			1/100 pol	mm
24	Óxido de alumínio	60	414	5/16	7,9	Pressão	Aço	500	13
60	Carbetto de Si ou óx. de alumínio						Inox	250	6
80	Óxido de alumínio						Plástico	250	6
						Pressão			

(1) Com óxido de alumínio, carbetto de silício ou escória: 75 psi (517 kPa),

(2) Com areia, granada ou ferro coquilhado: 90 psi (621 kPa)

O jato de abrasivo deve ser dirigido contra a superfície do substrato, num ângulo entre 75 e 90° e movido de uma extremidade a outra. A distância do bocal ao substrato pode variar de 10 a 30cm, dependendo do tamanho e tipo de abrasivo usado. abertura do bocal, tamanho e capacidade do equipamento. O tempo de jateamento é determinado por uma inspeção visual da superfície. Jateamento excessivo pode resultar em textura superficial inadequada.

A velocidade e o custo de jateamento dependem de vários fatores, incluindo o tipo, tamanho e capacidade do equipamento e do material do substrato usados. A Tabela X mostra o desempenho típico de alguns sistemas de jateamento.

Bicos maiores cobrem uma superfície maior que bicos com menor diâmetro, por hora. Entretanto, o tamanho do bocal deve ser escolhido em função da quantidade de ar comprimido disponível.

O tipo e tamanho do abrasivo também influenciam a velocidade de jateamento. Em geral, quanto maior o tamanho da partícula, mais lenta a operação. Aproximadamente 6,8kg de óxido de alumínio ou 11,3kg de ferro coquilhado são necessários para cada pé quadrado (0,1 m²) de superfície a ser jateada.

Abrasivos usados podem ser reciclados, limpos e reutilizados. Ferro coquilhado angular e óxido de alumínio são comumente reciclados. Abrasivos reutilizados devem ter pelo menos 80% de material com a granulometria original. Os grãos finos ou contaminados ou de qualidade questionável devem ser retirados, sob pena de comprometer o desempenho do revestimento. A Tabela XI dá uma idéia do número de vezes que um material abrasivo pode ser reciclado. Este número depende de diversas variáveis e serve apenas como indicação.

A fonte de ar comprimido deve ter capacidade suficiente para fornecer a quantidade adequada de gás, na pressão necessária. O ar deve ser isento de óleo, água e outros contaminantes, que podem comprometer a qualidade da superfície e a adesão do revestimento.

Tabela X - Velocidade de limpeza p/ acabamento metálico brilhante

Tipo de equipamento	Área limpa (m ² /h)	
	Mínima	Máxima
Sifão	0,93	1,86
Pressão	1,86	3,72
Cabine c/ retorno manual de abrasivo	2,79	5,51
Cabine c/ retorno automático de abrasivo	4,65	9,30

Tabela XI - Vida útil de abrasivos

Material	Nº de reciclagens
Óxido de alumínio	10
Ferro coquilhado	15
Aço	100
Granada	7