

# EFEITO DA RUGOSIDADE E DO PREAQUECIMENTO DO SUBSTRATO NA MORFOLOGIA E ADERÊNCIA DE REVESTIMENTOS DE ALUMÍNIO DEPOSITADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA

Ramón S.Cortés P (1), Ana Sofia C.M.d'Oliveira (2)

<sup>(1,2)</sup>Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC), Setor de Tecnologia  
Universidade Federal do Paraná (UFPR), CEP 81531-990, Curitiba PR, Brasil  
ramon@demec.ufpr.br ; sofmat@demec.ufpr.br

**RESUMO.** Os processos de aspersão térmica permitem depositar sobre uma superfície previamente preparada, materiais metálicos ou não metálicos, onde os principais mecanismos de aderência são por ancoramento mecânico e químico – metalúrgico. A preparação do substrato inclui a limpeza, a obtenção de rugosidade adequada e eventualmente realizar preaquecimento, com o intuito de garantir o ancoramento mecânico e pontos de microsoldagem. Na deposição de revestimentos de alumínio existem recomendações técnicas em quanto à rugosidade do substrato, sendo estas feitas sem considerar o efeito do preaquecimento. Com o objetivo de avaliar a morfologia das panquecas (splats), foram preparados corpos de prova com revestimentos de alumínio depositados por três processos de aspersão térmica, em substratos com diferente faixa de rugosidade com e sem preaquecimento. O trabalho mostra a diferentes morfologias das panquecas e avaliada a aderência ao substrato. Os resultados indicam que em substrato preaquecidos pode-se utilizar faixas de rugosidade menores às recomendadas pela literatura técnica nos três processos estudados. Sendo totalmente necessário o preaquecimento no processo a chama oxiacetilênica e desprezível nos processos a arco elétrico e chama de elevada velocidade.

**Palavras chaves:** Aspersão térmica, morfologia panquecas, aderência alumínio, preaquecimento, rugosidade.

## 1. Introdução

A tecnologia de aspersão térmica (AT) está composta de um grupo de processos por meio dos quais se deposita, sobre uma superfície previamente preparada, camadas de materiais metálicos, não metálicos ou depósitos dúplex (metálicos+metálicos e metálicos+não metálicos). As principais características da AT, no que concerne ao aspecto típico das camadas depositadas, estão esquematicamente apresentadas na Fig. (1).

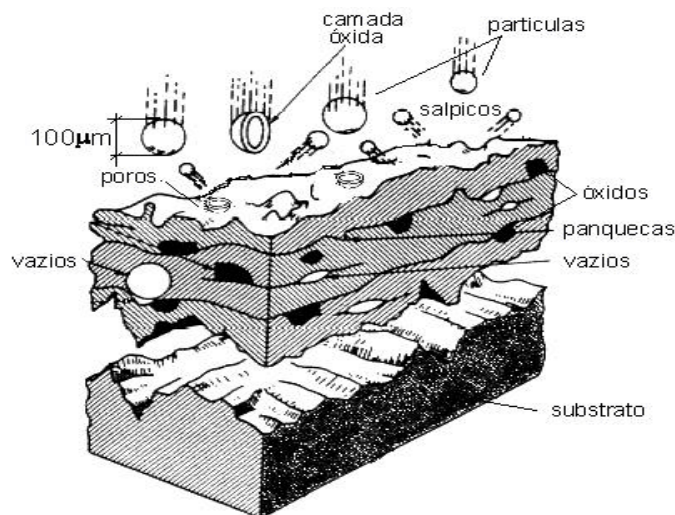


Figura 1. Características da formação da camada depositada por AT, Krespi (1993).

Na Figura (1) pode-se observar que um revestimento depositado por aspersão térmica se caracteriza por ter uma estrutura lamelar com incrustações de óxidos, um grau variável de porosidade e espaços vazios. O processo de AT envolve elevado aquecimento ou fusão do metal de adição, mas não do substrato, em forma industrial a utilização de materiais de deposição é feita na forma de pó ou arame.

Nos processos de AT, segundo Thorpe (1993), os materiais de deposição são fundidos ou aquecidos em uma fonte de calor gerada no bico de uma pistola apropriada por meio de combustão de gases, de arco elétrico ou por plasma. Imediatamente após a fusão, o material finamente atomizado é acelerado por gases (ar comprimido ou gases inertes) sob pressão contra a superfície a ser revestida, atingindo-a no estado fundido ou semi-fundido. Ao se chocarem contra a superfície, as partículas achatam-se e aderem ao material base em direção paralela ao substrato e na seqüência sobre as partículas já existentes, originando-se assim uma camada de estrutura característica, mas diferente de qualquer outra forma metalúrgica.

## 2. Metodologia, Materiais e Procedimentos

Com o objetivo de avaliar a morfologia das panquecas e a aderência camada substrato, foram preparados corpos de prova revestidos de alumínio e realizado ensaios de aderência por tração e exame metalográfico das partículas depositadas. Este trabalho analisa as principais propriedades que participam da deposição dos revestimentos de alumínio - preparação da superfície a ser revestida (limpeza, rugosidade e preaquecimento), porosidade da camada, material de aporte e gás de transporte, formação de óxidos e aderência da camada. Será dado ênfases à preparação da superfície por estar mais relacionado com a morfologia das panquecas e aderência camada substrato. Foram preparados corpos de prova utilizando os processos de AT a chama oxiacetilênica (Flame Spray - FS), arco elétrico (Arc Spray Process - ASP) e chama de elevada velocidade (High Velocity Oxi-Fuel - HVOF).

### 2.1. Materiais

Foi utilizado aço carbono 1020 (chapa de 400x250x10 mm e tarugos de 25,4 mm de Ø) como substrato e arame de Ø 3,2 mm e pó granulometria -90+45 microns de alumínio para depositar como revestimento..

### 2.2 Equipamentos de Aspersão Térmica

Processo a chama FS - Pistola METCO 12E; Processo ASP - Equipamento METCO 4RP; Processo HVOF - Equipamento - DJ 2004.

### 2.3. Procedimento de aspersão térmica (AT)

Com o objetivo de avaliar a morfologia e aderência das panquecas, foram depositados revestimentos de alumínio de uma passada e com múltiplas passadas em substratos com diferente faixa de rugosidade e, com e sem preaquecimento.

**2.3.1 Preparação da superfície:** Com vistas ao preparo da superfície, para garantir a aderência adequada dos revestimentos ao substrato deve-se ativar a superfície, para permitir que as partículas projetadas no momento do impacto fiquem totalmente aderidas e livres de impurezas residuais. Esta ativação da superfície consiste da preparação do substrato a ser revestido e consta de três etapas:

- (1) Limpeza tipo Sa2;Sa2,5;Sa3 (norma SIS 0559900/1967), obtida por processos químico, térmico ou mecânicos;
- (2) Rugosidade da superfície (obtida pelos processos de jateamento abrasivo ou mecânicos), e
- (3) Preaquecimento do substrato.

**Limpeza:** A tecnologia de AT e de forma especial, os mecanismos de aderência requerem o substrato limpo, isento, de ferrugem, de crostas de óxido de ferro, de graxa, de óleo e de umidade. Os padrões de limpeza na AT são alcançados através dos processos de jateamento abrasivo e com a maioria dos abrasivos (granalha de aço ou ferro, óxido de Al), porém o grau de aderência varia com o tipo de abrasivo utilizado, segundo Maranhão (1996). O grau de limpeza Sa3 (jateamento ao metal branco) foi obtido por comparação com os padrões publicados pela norma NACE RM 01/70.

**Rugosidade:** É usual, após a limpeza do substrato, trabalhá-la, o que pode ser realizado por jateamento abrasivo ou usinagem. Na AT de peças de grande porte, geralmente se utiliza o jateamento abrasivo, para obter ao mesmo tempo limpeza e rugosidade. De acordo com Armbruster et al (1991), superior aderência é atingida com abrasivos que, sem contaminar a superfície, proporcionam rugosidade adequada. Aqueles que melhor se enquadram são os abrasivos a base de óxido de Al. A forma das partículas do abrasivo também tem influência primordial na aderência, isto é, o impacto de partículas com formas angulares acarreta o arrancamento de material da superfície jateada (facilita o lascamento do material do substrato), originando mais irregularidades e pontos de ancoramento favoráveis à aderência do material depositado no substrato, elevando a energia superficial da base de ancoramento. Ao contrário, partículas esféricas tendem a aplainar a superfície

A rugosidade do substrato foi obtida através de jateamento abrasivo com óxido de Al branco (granulometria 30 Alundum 38A), jateamento de 100 a 200 mm de distância e a 100 psi de pressão. A medição foi realizada através de rugosímetro portátil, com apalpador de contato mecânico.

**Preaquecimento:** Atividade que deve de formar parte do processo de preparação de superfície para revestir materiais metálicos através da AT, o qual tem como objetivo proporcionar a queima e volatilização de graxas, óleos e umidade retidos junto à superfície do metal. O preaquecimento favorece a redução das tensões internas, que por sua vez influencia na aderência e coesão da camada. Quando as partículas se chocam com o substrato há um resfriamento muito rápido, acompanhado da contração do material depositado. O substrato por sua vez dilata-se ao absorver a energia de impacto (cinética) contida nas partículas, além daquela transferida pela chama ou plasma da pistola de AT. Em função disso ocorrem tensões contrárias na interface substrato-camada, que podem ser reduzidas e melhor distribuídas através do preaquecimento.

A faixa de temperatura estabelecida pelas referências técnicas é diversa, por um lado Lyman (1979) recomenda a faixa de 260 a 370 °C para o processo a chama FS do Al por outro lado em publicações recentes, Sulit (1993) e Cortés (1998), recomendam para o processo FS a utilização de 120 °C para aumentar a aderência camada substrato, coesão da camada, eliminar as tensões residuais e reduzir o diferencial de temperatura entre a camada e substrato. As temperaturas

dependem ainda, quanto às tensões térmicas residuais, da natureza dos materiais da camada e do substrato e de suas propriedades físicas (condutividade térmica, dilatação). Por outro lado, podem também ser um fator de influência sobre o desempenho esperado da camada, no que diz respeito à proteção contra a corrosão/oxidação. Para a deposição do Al no substrato de aço foi determinado avaliar substrato sem preaquecimento e na condição de substrato preaquecido a 120 °C.

### 2.3.2. Deposição de alumínio

Através das condições de AT com Al indicadas na Tab. (1) serão aluminizados 10 cps normalizados segundo a norma ASTM C633/79, dos quais em cinco deles foi medida sua resistência a tração para conhecer a tensão de aderência das camadas de Al ao substrato. Os outros cps foram preparados para análise metalográfica.

Tabela 1. Matrizes das condições experimentais para AT do Al por aspersão térmica.

AT	Fatores de controle Processo a chama oxiacetilênica FS						
	M	PA °C	D mm	FO. * 1	FA *2	PA psi	FA *1
F1	A	TA/120	300	50	45	100	55
F2	A	TA/120	300	40	35	100	55
F3	A	TA/120	300	50	45	80	45
[*1] 40 = 77,7 pés <sup>3</sup> /h / 50 = 93,4 pés <sup>3</sup> /h # [*2] 35 = 36,4 pés <sup>3</sup> /h / 45 = 47,3 pés <sup>3</sup> /h.							
AT	Fatores de controles processo a arco elétrico ASP						
	D mm	PAP psi	PAS psi	V V	C A	L grau	PA °C
A1	300	70	50	32	160	Sa3	TA/120
A2	300	70	60	26	160	Sa2,5	TA/120
A3	300	80	50	32	120	Sa2,5	TA/120
AT	Fatores de controle processo a chama de elevada velocidade HVOF						
	PO Psi	FO FMR	FN. *	PP psi	FP FMR	D mm	PA °C
H1	300	42	70	100	40	150	TA/120
H2	300	50	80	100	40	300	TA/120
H3	300	42	80	100	48	150	TA/120

[1 FMR Oxigênio]=6,3 SLPM/[1 FMR Propano]=1,7 SLPM (SLPM=Standard liter per minute); [\*]= unidade do FN especificado na pistola DJ 2004 a 125 psi de pressão. M=Material; A=arame; TP=temperatura de preaquecimento; D=distância; FO=Fluxo oxigênio; FA=Fluxo acetileno; PA=Pressão acetileno; FA= Fluxo acetileno; PAP=Pressão ar primário; PAS = Pressão ar secundário; V=Voltagem; A =Amper; L = Limpeza; PO=Pressão oxigênio; FN=Fluxo nitrogênio; PP=Pressão propano; FP=Fluxo propano.

**Deposição de uma única passada:** Para de avaliar a morfologia e formação de uma panqueca (splats) em relação à rugosidade e preaquecimento do substrato, foram preparados cinco corpos de prova, planos e cilíndricos, para cada condição de aspersão (Tab.1), revestidos com Al depositado pelos processos a chama oxiacetilênica (FS), arco elétrico (ASP) e chama de elevada velocidade (HVOF). O procedimento consistiu em passar uma só vez a pistola a elevada velocidade sobre corpos de prova cilíndricos de tração a 300 mm de distância. Posteriormente foi realizado exame metalográfico das panquecas depositadas nos substrato de aço.

**2.3.3. Espessura:** Na avaliação da aderência por tração, 360/380µm foi a espessura adotada. Nos cps preparados para os testes de aderência não foi utilizado selante. Na medição da espessura foi utilizado equipamento específico para medição de camadas não-magnéticas.

**2.3.4. Aderência:** A resistência mecânica de um revestimento depende da aderência entre a camada e o substrato, bem como da coesão entre as panquecas (partículas) depositadas. Trata-se de um requisito essencial para o bom desempenho do revestimento, pois de nada adianta ter uma camada com espessura ideal e livre de poros se a mesma não tem aderência suficiente. A análise da aderência do revestimento normalmente considera três mecanismos fundamentais, de acordo com a natureza das forças atuantes: mecânico, químico-metalúrgico e físico. A aderência é, pois, uma combinação destes três mecanismos. Quando do impacto das partículas aquecidas e aceleradas contra o substrato, essas se achatam numa forma lenticular, resfriam-se rapidamente e ancoram-se mecanicamente nas irregularidades da superfície, segundo Hoehne (1985). A medição da aderência segue o procedimento da norma ASTM C633/79.

### 3 Resultados e Discussão

#### 3.1. Rugosidade / Aderência

Os resultados da medição da rugosidade e da aderência, são apresentados na Fig. (2).

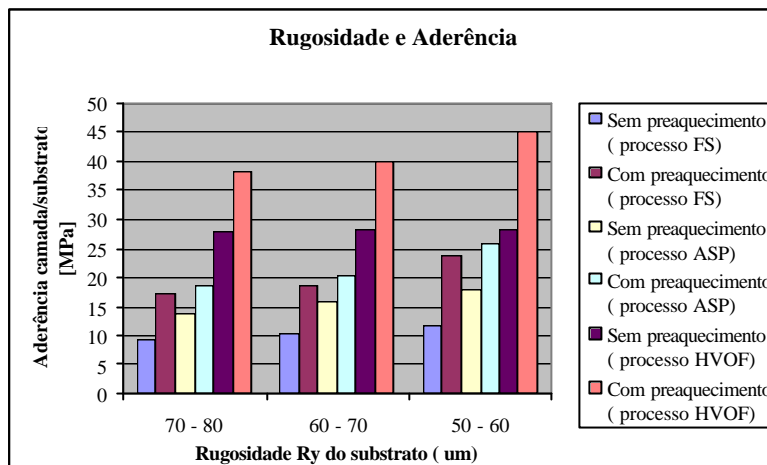


Figura 2. Relação da rugosidade do substrato com aderência de revestimentos de Alumínio depositados pelos processos de AT FS, ASP e HVOF.

A Figura (2) mostra a relação entre rugosidade de substratos com e sem preaquecimento, com a aderência de revestimentos de alumínio depositados pelos processos de AT FS, ASP e HVOF. As faixas de rugosidade obtidas e selecionadas para avaliação da aderência foram 70/80, 60/70 e 50/60  $\mu\text{m}$  de acordo com as condições estabelecidas para o jateamento abrasivo (2.3.1). Na medição da aderência a espessura das camadas foi na faixa de 382 a 396  $\mu\text{m}$ .

Dos resultados apresentados na Fig. (2) pode-se deduzir que na medida que se reduz a rugosidade do substrato de 70/80 até 50/60 nos substratos revestidos com Al sem preaquecimento, a aderência aumenta levemente nas camadas depositadas pelos processos a chama FS e arco elétrico ASP, não apresentando nenhum efeito nas camadas nos revestimentos depositados pelo processo HVOF.

De acordo com a literatura temos que a Marinha Americana (norma MS 2138-A, 1992) recomenda a faixa de rugosidade Ry de 80/100 $\mu\text{m}$  para garantir a aderência no processo a chama oxiacetilênica FS (aderência média de 13,8 MPa e nenhum valor inferior a 10,3 MPa). Por conseguinte, podemos deduzir que a redução da rugosidade do substrato só permite nos cps preparados pelos processos ASP e HVOF superam os requisitos de aderência da norma americana.

Na mesma Fig. (2) podemos observar que quando utilizado preaquecimento a aderência aumenta e com valores superiores aos exigidos pela norma da Marinha Americana nos cps preparados pelos três processos de AT. Por tanto, a redução da rugosidade aliado ao preaquecimento, permitem a obtenção de revestimentos de aderência superior aos exigidos por norma.

Por conseguinte, podemos afirmar que faixas de rugosidade menores às sugeridas pela norma da Marinha Americana, podem atingir e superar a aderência requerida pela norma americana nos processos ASP e HVOF em substratos sem preaquecimento e também no processo FS em substratos com preaquecimento a 120 $^{\circ}\text{C}$ .

Como princípio sabemos que a rugosidade do substrato realizada através de jateamento abrasivo, tem a finalidade de facilitar o ancoramento mecânico e de eliminar os planos preferenciais de cisalhamento que existem nas camadas depositadas em virtude da sua estrutura típica lamelar. O jateamento abrasivo faz com que a camada fique com textura rugosa, dividindo assim as tensões em pequenos componentes sobre as faces de cada pico da rugosidade e que se anulam em virtude dos sentidos opostos. Por tanto, é importante salientar que existe diferença na velocidade de transferência das partículas da pistola de aspersão até o substrato, nos processo a chama FS a velocidade varia de 100 a 150 m/s e arco elétrico ASP a faixa de velocidade varia de 100 a 250 m/s e no processo HVOF é superior a 400 m/s chegando a superar os 1.200 m/s e pistolas convencionais segundo Thorpe (1993) e os 5.000 m/s em pistolas mais modernas, de acordo com Cortés (1998).

Logo então, pode-se comentar que além do efeito da rugosidade e do preaquecimento, a velocidade de projeção das partículas das pistolas até o substrato participam de forma importante. A recomendação da Marinha America (faixa de rugosidade Ry de 80/100 $\mu\text{m}$ ), justifica-se pelo fato que na época só se tinham pistolas de aspersão com velocidades de aspersão bastantes inferiores às utilizadas neste trabalho. Pelo que, hera necessário ter substratos com rugosidade mais elevada para garantir bom ancoramento mecânico e atingir a aderência requerida por norma.

#### 3.2. Morfologia das panquecas

A Figuras (3, 4 e 5) mostram as micrografias de depósitos feitos pelos processos de AT FS, ASP e HVOF, de uma só passada em substratos com diferente rugosidade e, sem e com preaquecimento

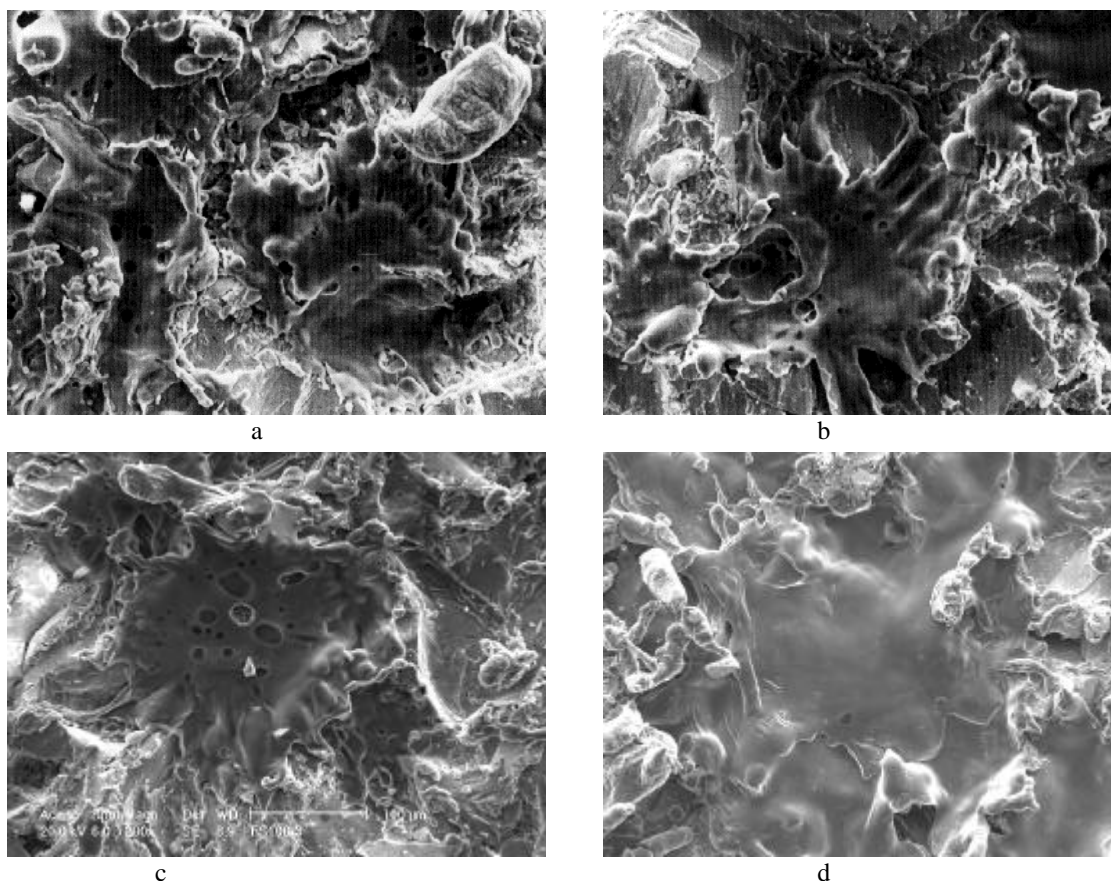


Figura 3. Morfologia das panquecas depositadas pelo processo FS em substratos com diferente rugosidade.

- a) Substrato de rugosidade Ry 70/80  $\mu\text{m}$  sem preaquecimento.
- b) Substrato de rugosidade Ry 70/80  $\mu\text{m}$  com preaquecimento.
- c) Substrato de rugosidade Ry 50/60  $\mu\text{m}$  sem preaquecimento.
- d) Substrato de rugosidade Ry 50/60  $\mu\text{m}$  com preaquecimento.

A Figura (3a) mostra partículas depositadas que não chegam a formar uma panqueca, só tem alumínio depositado na forma de salpicos. A Fig. (3b) mostra a panqueca ainda irregular, com poros no centro da panqueca, mais ainda com salpicos, também observa-se que no centro da panqueca fica um pouco melhor acomodada à rugosidade do substrato. Por conseguinte, pode-se deduzir que no caso da deposição de alumínio de uma passada em substrato sem preaquecimento e de maior rugosidade a partícula desintegra no momento do impacto nos picos da superfície rugosa, permitindo com isso que não forme panqueca e com muitos salpicos, que são de fraca aderência.

No caso da deposição em substratos com preaquecimento [Fig. (3b)], o efeito de molhamento do substrato atua na formação de uma panqueca em forma parcial, pelo fato de estar o substrato preaquecido, mais ainda é insuficiente para formar uma panqueca homogênea. A morfologia da Fig. (3b) mostra que esta contém porosidade e salpicos.

Isto pode ser explicado porque quando as partículas se chocam com o substrato há um resfriamento muito rápido, principalmente em substratos sem preaquecimento, acompanhado da contração do material depositado. Em função disso ocorrem tensões contrárias na interface substrato-camada, que afetam a atuação do mecanismo de molhamento. No caso do substrato com preaquecimento o resfriamento rápido fica reduzido, permitindo com isso que atue parcialmente o efeito de molhamento da partícula no substrato.

Com relação às Fig. (3c e d) que mostram as panquecas depositadas em substrato com menor rugosidade e substratos com e sem preaquecimento, podemos comentar o seguinte: observa-se na Fig. (3c) que a panqueca depositada em substrato sem preaquecimento e rugosidade menor, temos que foi formada uma panqueca, apresenta pequenos poros no centro e salpicos ao redor dela. Por tanto, pode-se deduzir que a diminuição da rugosidade permitiu que a partícula não desintegre no momento do impacto, facilitando com isso a transferência de maior calor ao substrato, permitindo a formação da panqueca, mas ainda insuficiente para formar uma panqueca homogênea, sem poros e salpicos.

Na Figura (3d) observa-se uma panqueca totalmente homogênea, sem porosidade e um mínimo de salpicos. Isto foi possível pela deposição de alumínio em substrato com menor rugosidade e com preaquecimento. Logo então, pode-se afirmar que a menor rugosidade e preaquecimento do substrato melhora significativamente o efeito de molhamento, permitindo a atuação do mecanismo de ancoramento mecânico da partícula no substrato.

Com relação à morfologia das panquecas de alumínio durante o ancoramento ao substrato, Dykhuizen (1994), apresentou interessantes resultados sobre o tipo e forma de solidificação das partículas no instante em que atingem o substrato durante a aluminização de superfícies preaquecidas a 20, 200 e 400  $^{\circ}\text{C}$ . Ele, observou que a maior

molhamento do substrato pela partícula leva a formação de lamelas do tipo panqueca. O achatamento e espalhamento horizontal das partículas é governada por uma interação entre energia cinética e as forças que se opõem no instante do choque: viscosidade, inércia e mais energia superficial. Se a superfície é molhada pela partícula, haverá um retardamento viscoso resultante das tensões de cisalhamento interfaciais entre material de adição e área da superfície atingida. Se não houver molhamento, restam somente as forças de viscosidade interna do material, a inércia e as forças da superfície. Estas forças poderão não ser capazes de contrabalançar a força devido a energia cinética. O achatamento prosseguirá até que seja criada uma superfície para absorver a energia cinética. Dykhuizen, relacionou os parâmetros velocidade, viscosidade e superaquecimento da partícula, entre outros, com a eficiência de deposição, inclusões de óxidos, porosidade e tensão de aderência, verificando que o preaquecimento (200 e 400 °C) permite obter um melhor molhamento das partículas no substrato pela diminuição do gradiente térmico partícula - superfície.

Neste trabalho, no qual foi utilizado só preaquecimento a 120°C para a deposição de revestimentos de alumínio para avaliação da aderência, foram obtidos valores elevados de aderência, que foram possíveis de obter pela utilização dos rugosidade menor e preaquecimento, aliado à utilização de parâmetros de aspersão otimizados por Cortés et al (1999), permitindo com isso a utilização de uma temperatura menor à utilizada por Dykhuizen.

Na Figura (4 a e b) é mostrada a morfologia das panquecas depositadas pelo processo a arco elétrico ASP.

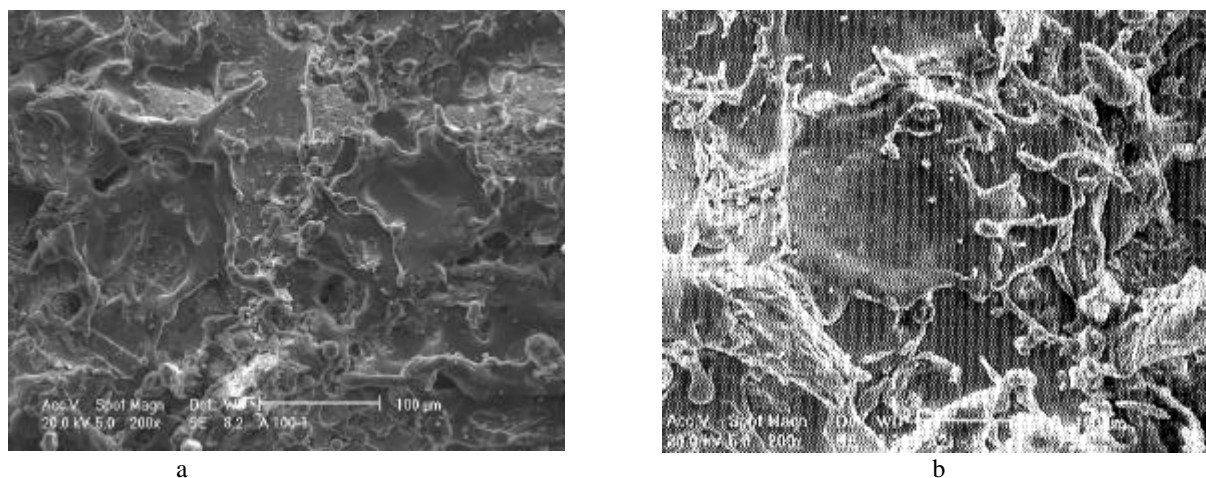


Figura 4. Morfologia das panquecas depositadas por ASP em substratos com diferente rugosidade

a) Substrato de rugosidade Ry 50/60 μm sem preaquecimento.

b) Substrato de rugosidade Ry 50/60 μm com preaquecimento.

A Figura (4a) mostra as partículas depositada em substrato sem preaquecimento pelo processo ASP, não tem aspecto de panqueca, aparecem pequenas áreas cobertas com Al com muitos salpicos. Neste processo as condições de deposição são diferentes aos processos que tem como fonte de calor chama. No processo ASP por ser a fonte de calor um de arco elétrico, as temperaturas envolvidas são muito elevadas (maiores que 5000 °C), isso faz que a passivação (formação do  $Al_2O_3$ ) do alumínio ocorra a elevada temperatura, permitindo com isso que durante a transferência até o substrato por meio de ar comprimido, a camada de óxido de alumínio aumenta de espessura e, no momento do impacto em substrato frio, desintegre e pequenas partículas, não formando panquecas, só partículas de alumínio em forma de salpicos. Pode-se deduzir que no caso da deposição de alumínio em substrato sem preaquecimento no atua o mecanismo de molhamento, mesmo com substrato de menor rugosidade, obtendo uma camada de menor aderência.

A Figura (4b) mostra a panqueca mais homogênea, sem poros, ainda com salpicos e a panqueca fica mais acomodada à textura do substrato. No substrato com preaquecimento fica favorecido o fenômeno de molhamento pela partícula no momento do impacto, formando uma panqueca homogênea, mais ainda com salpicos, que não prejudicam a aderência.

Nos processos de AT o material de aporte participa em primeiro lugar através de suas propriedades físico-químicas, ou seja, sua maior ou menor tendência à oxidação. O oxigênio, normalmente gás de transporte presente no ar utilizado, atua decisivamente na fase de transferência da partícula. Com a oxidação das gotas de metal líquido-fundidas, por meio do oxigênio do ar, forma-se um filme de óxido, relacionado com uma liberação da energia de reação que se produz durante a formação da camada de óxido. Na deposição de Al, conforme é de se esperar, a conversão  $Al \rightarrow Al_2O_3$  possui a máxima energia molar de formação [1.668 KJ/mol]. Esta oxidação deveria conduzir a uma adicional elevação da temperatura das gotas metálicas e causar, por meio da elevação de energia, uma melhora da aderência. A isso se contrapõe o resfriamento intensivo por meio do gás de transporte (ar comprimido), especialmente quando da AT por arco elétrico (ASP). Nestas condições, processa-se um resfriamento das partículas que irão atingir o substrato, já com temperaturas abaixo das necessárias, para que ocorram fenômenos aluminotérmicos e metalúrgicos.

Devido ao alto ponto de fusão do  $Al_2O_3$  (superior a 2000 °C) este não existe no processo de aspersão na fase líquida. Ele envolve a gota líquida com uma concha sólida, que se rompe por ocasião da incidência sobre o substrato e não mais reage como fase sólida com essa, prejudicando o contato entre o Al e o substrato, segundo Hoehne (1985).

Por conseguinte no processo ASP a morfologia das panquecas, que para distâncias usuais de aspersão (100 a 300 mm) as partículas alcançam o substrato em estado plástico, e não na forma líquida. A oxidação não pode, por conseguinte, contribuir para favorecer a aderência da camada por meio da elevação do valor de energia. Pelo contrário, resulta, através da formação de películas de óxido em torno das gotas metálicas, uma fase não metálica, a qual deve impedir reações epitaxiais.

Na Figura (5 a e b) é mostrada a morfologia das panquecas depositadas pelo processo a chama HVOF.

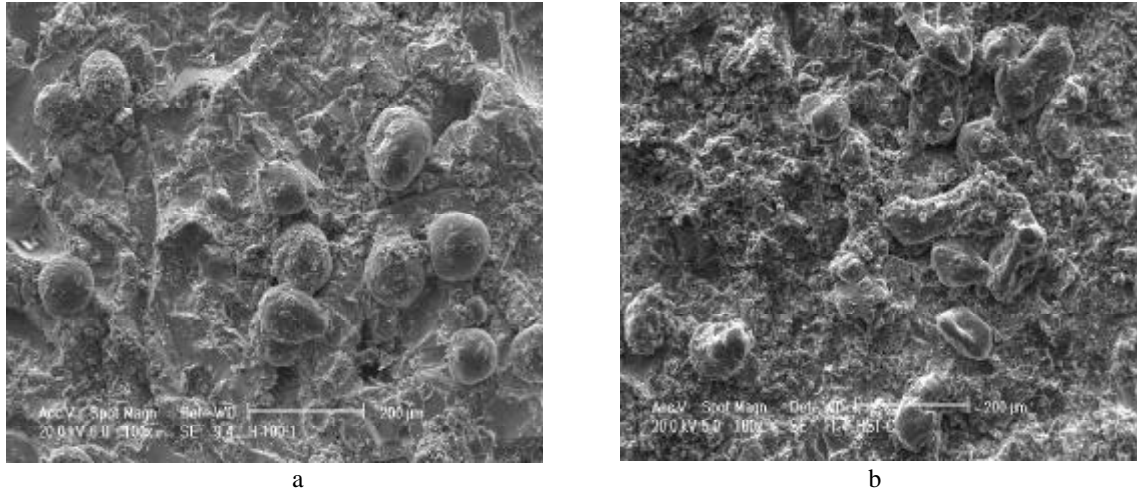


Figura 5. Morfologia das panquecas depositadas por HVOF em substratos com diferente rugosidade.

- a) Morfologia de Al depositado em substrato de rugosidade Ry 50/60  $\mu\text{m}$  sem preaquecimento.
- b) Morfologia de Al depositado em substrato de rugosidade Ry 56/60  $\mu\text{m}$  com preaquecimento.

A Figura 5a mostra as partículas depositadas pelo processo HVOF em substrato sem preaquecimento e menor rugosidade, observando-se que as partículas mantêm seu formato original (não tem a forma de panqueca) e ficam aderidas ao substrato só deformadas. A Figura 5b também mostra a não existência de panquecas, onde fica evidenciado que as partículas maiores mantêm sua textura e as menores fragmentam no momento de impacto em micro partículas. Por conseguinte, pode-se deduzir que no caso das partículas depositadas por HVOF não se produz molhamento, só ancoramento mecânico das partículas no substrato e que a faixa de rugosidade menor permite bom ancoramento das partículas no substrato, e que o preaquecimento permite apenas a fragmentação das partículas.

No processo HVOF para a deposição de alumínio pode-se afirmar que o mecanismo de aderência é principalmente por ancoramento mecânico, que fica garantido pela elevada velocidade de transferência das partículas, que não fundem na pistola e que atingem a elevada velocidade o substrato. O preaquecimento do substrato permite que no instante do impacto as partículas transferem maior quantidade de calor ao substrato, facilitando com isso que as partículas deformem ainda mais e forme uma camada de maior aderência, além de permitir que as partículas que fragmentam no impacto com o substrato, preencham os espaços que ficam entre as partículas que apenas deformam.

#### 4 Conclusões

De acordo com os resultados conclui-se o seguinte:

Só os revestimentos depositados pelos processos ASP e HVOF em superfícies de maior rugosidade e sem preaquecimento, cumprem as exigências de aderência solicitadas por norma. No caso do Al depositado por FS só atinge os valores de norma quando o substrato é preaquecido.

Nos processos ASP e HVOF a redução da rugosidade de 70/80 para 50/60  $\mu\text{m}$  produz aumento da aderência, inclusive com substrato sem preaquecimento.

No caso dos depósitos feitos pelo processo a chama FS pode-se concluir que no caso do substrato sem preaquecimento a partícula no momento do impacto não produz o efeito de molhamento homogêneo, permitindo a formação de porosidade e salpicos, o que justifica ter menor aderência.

No caso dos depósitos feitos pelo processo a chama FS pode-se concluir que no substrato com preaquecimento fica favorecido o fenômeno de molhamento pela partícula no momento do impacto, formando uma panqueca homogênea, sem porosidade, mais ainda com salpicos, que não prejudicam a aderência.

Referente ao processo HVOF o efeito da rugosidade não apresenta nenhuma influência na formação de revestimentos porosos, sendo que o preaquecimento minimiza os espaços vazios que ficam entre as partículas que só deformam no momento do ancoramento no substrato e nas partículas já aderidas.

Pelo aspecto do molhamento da panqueca no substrato, o efeito combinado de menor rugosidade e preaquecimento do substrato permite concluir que a panqueca de melhor aspecto superficial é a depositada pelo processo a chama FS.

## Agradecimentos

À empresas de Metalização Revesteel e Nicrom de Curitiba PR pela sua colaboração.

## 5 Referências

- Armbruster, R., et al, 1991, "Effects of Abrasive Characteristics and coatings type on Blast production Rates". Cincinnati Corrosion/91.
- Cortés, R., 1998, "Estudo de revestimentos de Al depositados por três processos de AT para a proteção do aço contra a corrosão marinha". Tese de doutorado, UFSC, Brasil.
- Cortés, P. R., Buschinelli, A., Piza, M., 1999, "Propriedades dos Revestimentos de Alumínio depositados por Aspersão Térmica". IV Congresso Iberoamericano de Ingenieria Mecánica – CIDIM, Santiago, Chile.
- Dykhuizen, R.C., 1994, "Review of Impact and Solidification of Molten Thermal Spray Droplets". ASM International. Journal of Thermal Spray Technology. vol 3(4), p.351-361.
- Hoehne, K., 1985, "Haftvermittelnde Schichten beim thermischen Spritzen von Metallen". SchweiBtechnik, vol.35, Nº. 11, p.497-499. Berlin35.
- Krepiski, R.P. ,1993, "Thermal Spray: Coating Applications in the Chemical" Process Industries.Published for the materials Technology Institute of the Chemical Process Industries, Inc, by NACE 2, 8p.
- Lyman, T.,1979, Metals Handbook, 8 ed., v.2, p. 494 - 496.
- Maranho, O., Cortés, R. e outros, 1996, "Influência da preparação da superfície de aço Carbonona aderência de camadas de alumínio depositadas por aspersão térmica a chama". Anais 12 - CBECIMAT, p. 905-908, Águas de Lindóia/SP.
- MIL - STD 2138A. ,1992, "Metal Sprayed Coatings for Corrosion Protection Aboard Ships".
- Shaw, A.B. and Moran, P.J., 1985, "Characterization of the corrosion behavior of Zn- Al Thermal Spray Coatings". Materials Performance Paper number 212 Corrosion 85, p. 22-31. Boston, USA.
- Sulit R. A., 1993, "Guide for the Protection of Steel with Thermal Spray Coatings of aluminum and Zinc and Their Alloys and Composites". AWS - Proceedings of the 1993 National Thermal Spray Conference, Anaheim, CA, p. 7-11. June.
- Thorpe, M. ,1993, Thermal Spray. Advanced Materials & Processes / 93

## EFFECT OF THE RUGOSITY AND THE PREHEATING OF THE SUBSTRATUM IN THE ALUMINUM MORPHOLOGY AND ADHRENCE COVERING DEPOSITED BY THERMAL SPRAY

Ramón S.Cortés P (1), Ana Sofia C.M.d'Oliveira (2)

<sup>(1,2)</sup>Departament of Mechanical Engineering (DEMEC), Sector of Technology Federal University of the Paraná (UFPR), CEP 81531-990, Curitiba PR, Brazil  
ramon@demec.ufpr.br ; sofmat@demec.ufpr.br

*Abstract. Basically through the thermal spray if it deposits on a surface previously prepared material metallic or not metallic, where the main mechanisms of tack are for mechanical and chemical anchor - metallurgist. The red tape of the substratum considers the cleanness, the attainment of rugosity surface and eventually to carry through preheating, with intention to guarantee the mechanical anchor and points of microwelding. In the aluminum covering deposition recommendations exist techniques in how much to the rugosity of the substratum, being these making without considering the effect of the preheating. With the objective to evaluate the morphology of splats, test samples with aluminum coverings deposited by three processes of thermal spray had been prepared, in substratum with different band of rugosity with and without preheating. The work shows the different morphologies of panquecas and evaluated the adhrence to the substratum. The results indicate that in substratum prewarm it can be used lesser bands of rugosity to recommended for literature the technique in the three studied processes. Being total necessary the preheating in the process the flame spray and worthless in the processes the electric arc and flame spray of high speed.*

*Keys words: Thermal spray, morphology splats, adherence aluminum, preheating, rugosity.*