

PROPRIEDADES DOS REVESTIMENTOS DE ALUMÍNIO DEPOSITADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA.

Ramón S.Cortés P. DEMEC UFPR, caixa postal 19011. email <ramon@demec.ufpr.br>

Augusto J.A. Buschinelli. EMC UFSC, email <buschi@emc.ufsc.br>

Marcelo T. Piza P. CENPES Petrobras, email <MTTP@CENPES.PETROBRAS.COM.BR

RESUMO

Este trabalho tem inicialmente uma breve revisão das características dos processos de aspersão térmica [AT] a chama oxiacetilênica [FS], arco elétrico [ASP] e chama de elevada velocidade [HVOF], com o objetivo de prever a influência dos procedimentos de deposição do alumínio [Al] como revestimento protetor do aço. Através da metodologia de planejamento experimental de arranjos ortogonais de Taguchi buscou-se avaliar o efeito dos parâmetros dos processos FS, ASP e HVOF, considerando no modelo sete fatores variáveis e três fixos e caracterizados os revestimentos através dos ensaios de aderência por tração e dobramento e porosidade. Nos corpos de prova preparados pelos três processos de AT foram encontrados ótimos resultados, destacando que no processo FS torna-se fundamental realizar preaquecimento do substrato para atingir os requisitos de aderência estabelecidos por norma (AWS), só podendo ser dispensado para esse processo quando utilizadas camadas de ligação de NiAl e aço inoxidável martensítico. Nos processos ASP e HVOF os revestimentos de Al mostraram excelente desempenho na aderência, inclusive sem preaquecimento do substrato.

1. Introdução.

De acordo com a literatura [1,2] melhores propriedades do revestimento de Al (maior aderência e menor porosidade) podem ser alcançadas através de processos de maior energia, como a AT ASP ou a chama HVOF. Apesar disso, a mais antiga e convencional AT a chama FS ainda desperta grande interesse pelo baixo custo relativo da sua aplicação, além de facilidade no manuseio da pistola e na operação do equipamento. Quanto à resistência a corrosão numerosos trabalhos avaliam o comportamento em meios sintéticos e naturais de camadas de Al depositadas pelo processo de AT FS. No entanto, o mesmo não se pode dizer para camadas depositadas pelo processo ASP e, em particular, para o caso do revestimento feito por HVOF. Essas foram as motivações para um amplo programa de pesquisa, que abordou desde as condições de limpeza e preparação da superfície do substrato, até o comportamento à corrosão das camadas de Al obtidas por esses três diferentes processos e condições de AT [3].

O trabalho aqui apresentado teve como objetivo caracterizar a influência das variáveis operacionais na qualidade das camadas de Al depositadas por AT FS, ASP e HVOF, através de ensaios sob condições controladas de AT, baseado no planejamento estatístico experimental concebido por Taguchi [4]. Além disso, no caso particular do processo de AT FS, foi analisada a necessidade de preaquecimento do substrato e/ou o uso de camadas intermediárias (NiAl e aço inox martensítico) para qualificar as camadas de Al de acordo com os níveis de aderência exigidos por normas vigentes.

2. Características das camadas depositadas por AT.

Basicamente através da AT se deposita sobre uma superfície previamente preparada materiais metálicos ou não metálicos. Os materiais de deposição são fundidos ou aquecidos por uma fonte de calor gerada no bico de uma pistola apropriada, por meio de combustão de gases ou de arco elétrico. Imediatamente após a fusão ou aquecimento, o material finamente atomizado é acelerado por gases sob pressão contra a substrato, atingindo-a no estado fundido ou semi-fundido (vide figura 1). Ao se chocarem contra a superfície, as partículas achatam-se e aderem ao material base ou sobre as partículas já existentes, originando-se assim uma camada de estrutura típica contendo inclusões de óxidos e porosidade [5].

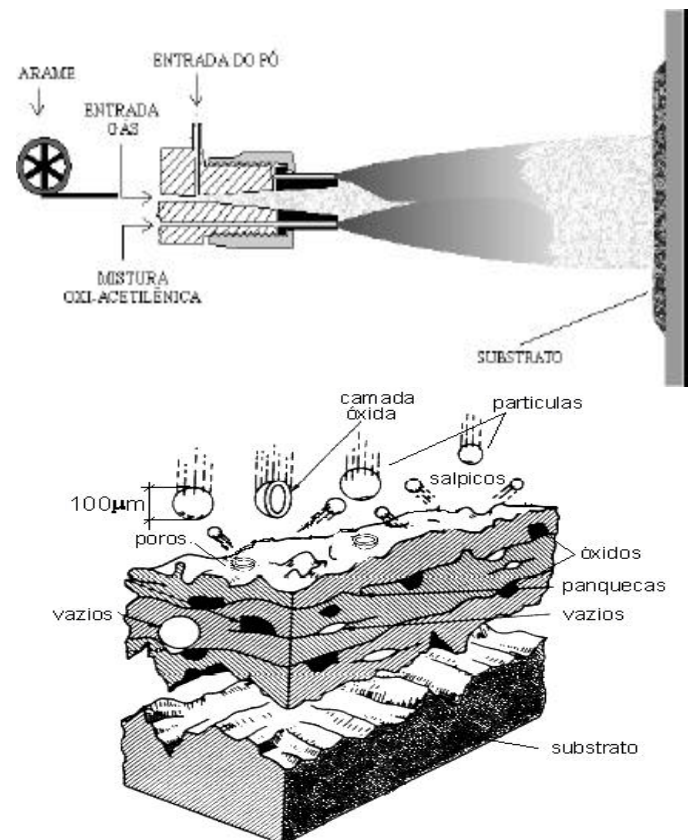


Figura 1. Características da camada depositada por AT [3].

Aderência: A aderência de um revestimento resulta da combinação de três mecanismos fundamentais, de acordo com a natureza das forças atuantes: *mecânico, químico - metalúrgico e físico*. Quando do impacto das partículas contra o substrato, essas se achatam numa

forma lenticular, resfriam-se e ancoram-se *mechanicamente* na superfície rugosa. Por outro lado, em função da natureza do material, - se metálico ou cerâmico - e do calor transferido para o substrato, pode ocorrer micro-soldagem, podendo haver fusão localizada, difusão atômica com formação de soluções sólidas e inclusive compostos intermetálicos, caracterizando o mecanismo *químico - metalúrgico*. O terceiro mecanismo, considerado secundário, é de natureza *física*, quando ligações fracas do tipo van der Waals contribuem para a aderência[3,5].

Análise dos fatores que participam da aderência:

Material de aporte e gás de transporte: O material de aporte participa em primeiro lugar através de suas propriedades físico-químicas. No caso do Al ocorre, em maior ou menor grau, em função da fonte de calor e do poder oxidante do gás de transporte a conversão $Al \rightarrow Al_2O_3$. Pelo seu alto ponto de fusão (~2000 °C) esse óxido não se funde e envolve como concha sólida as partículas da fase metálica. Isso é prejudicial à aderência do alumínio, pois no instante do impacto com o substrato a presença de uma película não-metálica impede reações epitaxiais [6]. Segundo Grasmann [7] para obtenção de uma boa aderência no processo ASP o Al deve ser aspergido a temperatura de no mínimo 4000 °C. Por outro lado, a aderência do Al ao substrato também depende da velocidade de impacto, assim no processo HVOF as partículas projetadas entre 400 e 1200 m/s permitem pela sua alta energia cinética o rompimento da camada oxidada e pontos de “microsoldagem” com o substrato metálico.

Preparação do substrato: Ativação do substrato através de:

Limpeza: Para obter adequada aderência se requer o substrato limpo, isento portanto de ferrugem, de crostas de óxido, de graxa, de óleo e de umidade. Os padrões de limpeza exigidos (Sa2.5, Sa3) no caso de revestimentos com Al são alcançados através de jateamento com a maioria dos abrasivos (areia, granalha, Al_2O_3 , etc.), porém o grau de aderência varia com o tipo de material utilizado [5].

Rugosidade da superfície: É usual, após a limpeza asperizar o substrato, o que é realizado na AT por jateamento abrasivo, obtendo-se ao mesmo tempo limpeza e rugosidade. Superior aderência é atingida com abrasivos que, sem contaminar a superfície, proporcionem rugosidade adequada. Aqueles que melhor se enquadram são os abrasivos à base de Al_2O_3 . A forma das partículas também tem influência na aderência, isto é, o impacto de partículas com formas angulares acarreta o arrancamento de material da superfície, originando mais irregularidades e pontos de ancoramento favoráveis à aderência.

Preaquecimento: Melhorar a limpeza e favorece a redução das tensões internas o que, por sua vez, aumenta a aderência e coesão da camada. A temperatura recomendada pela AWS [8] para a AT de Al por FS é de 120 °C, para evitar respingos e reduzir a oxidação.

Porosidade e óxidos: Na AT, obtêm-se camadas com porosidade e óxidos, o que afeta diretamente a coesão e aderência e estão relacionados com os parâmetros de processo. Com base na tabela 1 pode-se analisar a influência destes parâmetros.

Processo FS: Neste processo as partículas oxidam pelo contato com o oxigênio contido no ar comprimido. Os teores de óxidos são variados, 0,4 % [7,9] até 10 % [10], as referências consultadas não especificam se o material utilizado foi pó ou arame. A porosidade esta relacionada com a formação das panquecas e vazios entre as lamelas e partículas depositadas.

Processo HVOF: Em geral as camadas de distintos materiais depositadas por este processo tem pouca porosidade e óxidos [1], principalmente porque é utilizado gás nitrogênio a elevada velocidade para transferir as partículas até o substrato. Para esse

processo a literatura consultada não fornece dados das propriedades dos revestimentos de Al puro. Os dados da tabela 1 são provenientes de ensaios feitos no Labsolda/UFSC [3], destacando-se que a porosidade é a mais baixa dos três processos.

Tabela 1. Parâmetros característicos da AT.[3,5,7-11]

Processos Parâmetros	FS [pó]	FS [arame]	HVOF [pó]	ASP [arame]
Temperatura Chama/Arco [° C]	2200 3200	2800 3200	2700 3100	4000 6000
Velocidade Transferência [m/s]	30 150	100 250	400 1200	100 250
Atmosfera 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
Óxidos [%]	0,4 - 10		1 - 5	2,5 - 15
Porosidade [%]	5 - 15		<3	3 - 5
Aderência [MPa]	4 - 20		> 36	10 a 36

Processo ASP: Processo que utiliza ar comprimido para transferir as partículas fundidas até o substrato. Os teores de óxidos são variados, 2,5/3 % [7,9] e 15% [10], a oxidação das partículas depende da fonte de calor (tensão/corrente), 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. Kreienbuehl [9] e posteriormente Grasmann [7] ao utilizarem este tipo de pistola, verificaram que a porosidade passante até o substrato é 40 vezes menor em camadas de ~200 µm de espessura. Além disso, Amin [13] verificou que a distancia pistola/substrato (<150 mm) é considerada fundamental na obtenção de níveis baixos (<5%) de porosidade.

3. Metodologia experimental.

A análise de um processo dependente de muitas variáveis como a AT, a que pode ser realizada em forma otimizada através do planejamento estatístico. Neste contexto, foi utilizada a metodologia estatística proposta por Taguchi, que constitui um eficiente método para estudar os efeitos de vários fatores de controle simultaneamente, com menos esforço experimental ao que seria necessário usando métodos como o da tentativa e erro, um fator de cada vez, ou os experimentos fatoriais completos [3,4].

O planejamento estatístico recomenda o uso dos arranjos ortogonais para construir as matrizes de controle e de ruído. A metodologia requer a identificação das respostas (aderência e porosidade), fatores de controle e parâmetros fixos (rugosidade do substrato, grau de limpeza do substrato, abrasivo e espessura da camada). Definidos os fatores de controle e fixos o passo seguinte consiste da construção da matriz de experimentos. No caso, utiliza-se uma matriz de experimentos composta de 7 fatores de controle com dois níveis para cada fator.

Optou-se, portanto, por selecionar um arranjo ortogonal padrão L8, que permite a realização de oito experimentos. As matrizes com os dados experimentais encontram-se nas tabelas 2, 3 e 4. A etapa seguinte considera a realização da AT em dez (10) corpos de prova (cps) e posteriormente as medições das respostas. A partir destes dados executa-se a análise estatística para determinar o nível de influência de cada um dos fatores.

Tabela 2 - Condições experimentais para AT FS

Fatores de controle do processo a chama FS							
Exp	M	TP °C	D mm	FO [* 1]	FA [*2]	PA psi	FA [*]
F1	arame	T.A.	100	40	35	80	45
F2	arame	T.A.	100	50	45	100	55
F3	arame	120	300	40	35	100	55
F4	arame	120	300	50	45	80	45
F5	pó	T.A.	300	40	45	80	55
F6	pó	T.A.	300	50	35	100	45
F7	pó	120	100	40	45	100	45
F8	pó	120	100	50	35	80	55

[*1] 40 = 77.7 pés³/h / 50 = 93,4 pés³/h;[*2] 35 = 36,4 pés³/h / 45 = 47,3 pés³/h**Tabela 3 - Condições experimentais para AT por ASP.**

Fatores de controle do processo a arco elétrico ASP							
Exp	D mm	PAP psi	PAS psi	V V	C A	L grau	PA °C
A1	100	70	50	26	120	Sa2,5	T.A.
A2	100	70	50	32	160	Sa3	120
A3	100	80	60	26	120	Sa3	120
A4	100	80	60	32	160	Sa2,5	T.A.
A5	300	70	60	26	160	Sa2,5	120
A6	300	70	60	32	120	Sa3	T.A.
A7	300	80	50	26	160	Sa3	T.A.
A8	300	80	50	32	120	Sa2,5	120

Tabela 4 - Condições experimentais para AT por HVOF

Fatores de controle do processo a chama HVOF							
Exp	PO psi	FO. FMR	FN [*]	PP psi	FP FMR	D mm	PA °C
H1	150	42	70	100	40	150	T.A.
H2	150	42	70	120	48	300	120
H3	150	50	80	100	40	300	120
H4	150	50	80	120	48	150	T.A.
H5	180	42	80	100	48	150	120
H6	180	42	80	120	40	300	T.A.
H7	180	50	70	100	48	300	T.A.
H8	180	50	70	120	40	150	120

[1 FMR Oxigênio]=6,3 SLPM; [1 FMR Propano]=1,7 SLPM (SLPM = Standard liter per minute); [*] = unidade do fluxo de nitrogênio a 125 psi de pressão.

M = Material; 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; FO = Fluxo oxigênio; FN = Fluxo nitrogênio; PP = Pressão propano; FP = Fluxo propano.

4. Procedimentos de AT e caracterização das camadas.

Materiais: Substrato de aço carbono 1020; Al Ø 3,2 mm (METCO MAL-12), pó de Al granulometria -90+45 microns (METCO 54NS); aço inox martensítico Ø 3,2 mm (METCOLOY # 2) e liga NiAl Ø 3,2 mm (METCO 405).

Equipamentos de AT: FS - Pistola METCO 12E; ASP - Equipamento METCO 4RP, HVOF - Equipamento - DJ 2004.

Preparação da superfície: A limpeza e rugosidade do substrato foram realizadas através de jateamento abrasivo com óxido de Al branco granulometria 30 Alundum 38A, jateamento a 100 mm de distância e a 100 psi de pressão. O grau de limpeza Sa3 (exceto no processo ASP), foi obtido por comparação com os padrões de qualidade superficial publicados pela norma NACE RM 01/70.

Medição da espessura: Na avaliação da aderência por tração, 380µm foi a espessura mínima adotada, enquanto para os ensaios de aderência por dobramento foram de 175µm a 250µm. Nos cps preparados para os testes de aderência não foi utilizado selante. A medição da espessura foi utilizado equipamento da marca Mitutoyo específico para medição de camadas não-magnéticas.

Medição da aderência por tração: Para a análise quantitativa foi utilizado o teste proposto pela norma ASTM C633/79. Para colagem dos cps foram utilizados os adesivos de cura a frio 3M CA-9 e Araldit AW 106 com endurecedor HV 953 U.

Aderência por dobramento: A metodologia segue estritamente o recomendado pela norma MIL 2138 A/92 e Petrobrás BR N-2568/96.

Medição da porosidade: A quantificação da porosidade do revestimento de Al foi feita em cps observados no MEV, auxiliado por analisador de imagens modelo analySIS 2.0 marca Users Guide. O equipamento permite quantificar os parâmetros: área da camada, fração de área (poros), área média e número de poros.

5. Resultados e Discussão.

5.1. Aderência por tração:

Camadas depositadas por AT FS: Pelos resultados da tabela 5 pode-se verificar que só num caso (Exp. F3) foram atingidos os valores mínimos de aceitação das normas Petrobrás N2568 e da AWS C2.18/93 (média de 13.8 MPa sem nenhum valor inferior a 10.3 MPa). Na figura 1 a influência de cada variável de processo é demonstrada pela inclinação maior ou menor dos segmentos de retas, que conectam os valores de aderência obtidos com os menores níveis das variáveis (a esquerda) aos de maiores níveis (a direita). Por exemplo, para o caso do preaquecimento verifica-se um aumento da aderência com o incremento da temperatura do nível 1(TA) para o nível 2 (120 °C).

Tabela 5 – Aderência de camadas depositadas por AT FS

AT	Espessura [µm]		Aderência [MPa]		Ruptura Predominante
	Média	Desvio	média	desvio	
F1	392	8.4	9,5	1,2	Ad
F2	382	8.3	11,8	0.7	Ad
F3	386	11.5	20.2	0.8	Ad
F4	386	11.4	13.7	3.3	Ad/Co
F5	370	12.2	5.5	0.5	Co
F6	387	12.7	6,0	0.5	Coesão
F7	395	14.0	13,1	1.4	Ad/Co
F8	395	10.4	12,7	1.3	Ad

Ad = aderência; Co = adesivo

Pode-se constatar através da figura 2 que o preaquecimento do substrato é a variável de maior influência sobre a aderência, indo ao encontro do relatado pela literatura que diz ser o preaquecimento fundamental para a eliminação de impurezas e diminuição do gradiente térmico (reduz as tensões internas) entre a material depositado e substrato. Isso permite que as primeiras partículas que atingem a superfície tenham melhor aderência pelo maior efeito de molhamento e menor quantidade de salpicos.

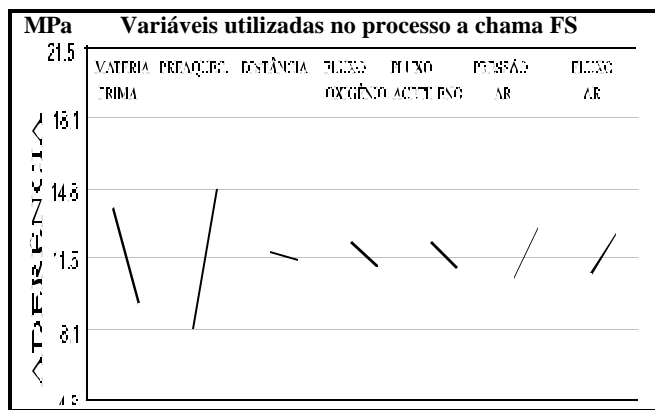


Figura 2. Influência das variáveis na aderência no processo AT FS.

Aderência da camadas depositadas por AT ASP: A tabela 6 traz os valores de aderência, onde pode-se ver que todas as condições de aspersão testadas superam os valores mínimos das normas Petrobrás e da AWS. Deve-se ressaltar também que os melhores resultados atingidos nas condições de AT A2, A3 e A7, representam valores mínimos de aderência, dado que a ruptura foi no adesivo. Portanto, para selecionar a condição otimizada de AT foram consideradas as medidas de porosidade e também avaliados os testes de dobramento.

Tabela 6 - Aderência de camadas depositadas por AT ASP

AT	Espessura [μm]		Aderência [MPa]		Ruptura Predominante
	média	desvio	média	Desvio	
A1	376	18.6	14,6	1.1	Ad/Co
A2	379	14.1	20,6	1.5	Co
A3	390	12.3	18,5	0.8	Co
A4	389	7.3	17,3	1.1	Ad/Co
A5	396	5.5	15,8	3.0	Ad/Co
A6	398	13.0	14,4	0.9	Ad/Co
A7	386	12.1	18,0	1.4	Co
A8	397	5.2	18,5	2.0	Ad/Co

Na análise estatística foram adotados os dados da tabela 6, portanto valores “mínimos” de aderência para os casos A2, A3 e A7. Pela figura 3 pode-se verificar que o preaquecimento também foi a variável de maior influência sobre a aderência.

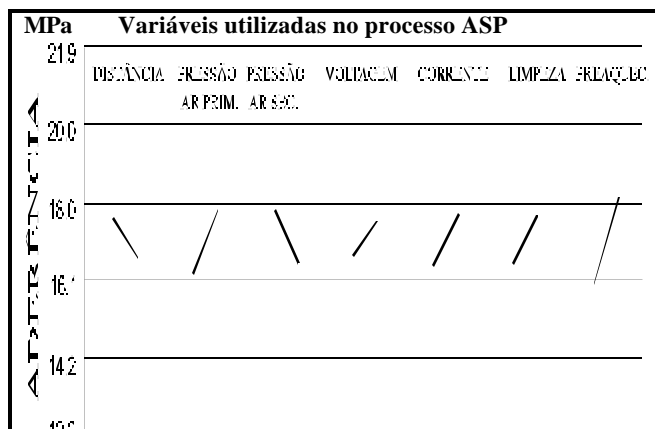


Figura 3. Influência das variáveis na aderência no processo AT ASP.

Na deposição do Al depositado por ASP a fonte de calor (4000/6000 °C) transfere às partículas mais energia, permitindo com isso que algumas partículas fundidas atinjam o substrato ainda líquidas. Portanto, além do ancoramento mecânico, admite-se possível também pontos de micro-soldagem e mesmo difusão do Al no aço, atuando o mecanismo de aderência metalúrgico. Isso justificaria os elevados valores de aderência obtidos mesmo nas condições testadas sem preaquecimento.

Aderência de camadas depositadas por AT HVOF: A tabela 7 traz os valores de aderência obtidos nas oito condições de teste. Verifica-se que a ruptura em todos os cps foi no adesivo com valores em torno de 20 MPa. Isto impossibilita a definição exata da influência das variáveis de processo na aderência, pois esses valores são os mínimos que a camada suporta. Para a análise da influência das variáveis de processo será adotada outra propriedade da camada, a porosidade. Por outro lado pode-se afirmar que na maioria das condições adotadas nesse processo os resultados de aderência foram superiores aqueles obtidos nos processos FS e ASP.

Tabela 7 - Aderência de camadas depositadas por HVOF

AT	Espessura [μm]		Aderência [MPa]	Ruptura Predominante
	Média	desvio		
H1	378	5.6	23,4	Co
H2	388	13.2	21,9	Co
H3	390	10.0	19,8	Co
H4	396	11.6	20,8	Co
H5	408	12.8	18,3	Co
H6	400	7.1	23,0	Co
H7	390	10.2	22,0	Co
H8	386	9.7	21,4	Co

5.2. Porosidade: O tamanho mínimo de poro medido foi de $5 \mu\text{m}^2$ e a área da camada $\sim 300.000 \mu\text{m}^2$. Os dados da tabela 9 representam valores médios de 5 medições.

Porosidade em cps aluminizados por AT FS.

Da tabela 8 pode-se deduzir que nas oito condições experimentais a porosidade medida é considerada baixa para AT FS (média de 5.5%). A condição experimental F3 apresenta a menor porosidade com tamanho médio dos poros de $\sim 42 \mu\text{m}^2$. A figura 4 permite observar que as variáveis material e preaquecimento são as que mais influenciam a porosidade, na figura 5 observa-se a microestrutura de uma panqueca depositada em substrato sem e com preaquecimento.

Tabela 8. Porosidade nas camadas de alumínio.

AT	Porcentagem de porosidade [%]		
	FS	ASP	HVOF
	média	média	média
1	5.8	3.1	0.4
2	5.1	1.0	1.0
3	3.8	3.2	2.6
4	4.5	3.5	1.6
5	7.5	5.1	3.0
6	7.3	6.1	2.4
7	4.6	3.9	1.9
8	5.4	4.8	0.7

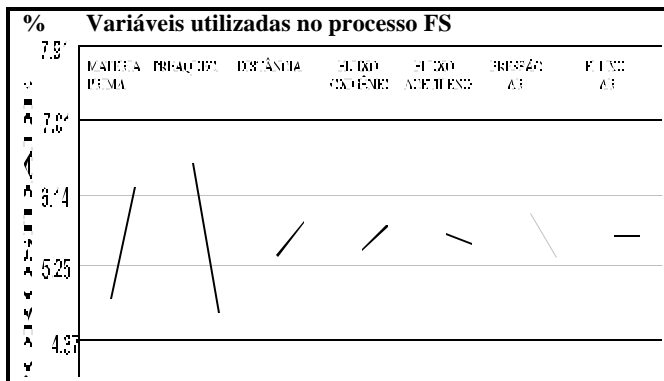


Figura 4. Influência de variáveis do processo FS sobre a porosidade.

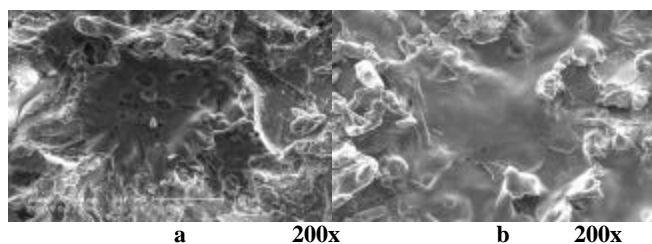


Figura 5. Microfotografias MEV de panquecas depositadas por AT FS em substratos sem (a) e com preaquecimento a 120 °C (b).

A figura 5a mostra uma partícula depositada que tem a forma de panqueca, com poros na região central e salpicos. A figura 5b mostra panqueca bastante homogênea, sem poros e com mínimo de salpico, caracterizando que fica adequadamente acomodada à textura do substrato, sendo que também o preaquecimento favorece o fenômeno de molhamento do substrato pela partícula no momento do impacto.

Porosidade em cps aluminizados por AT ASP.

Dos dados da tabela 8 pode-se deduzir que a fração de porosidade no processo ASP é muito boa, com média <4% nas oito condições experimentais. O tamanho médio dos poros da condição A2 é de $\sim 30\mu\text{m}^2$. A figura 6 permite observar que os fatores distância, pressão de ar secundário e corrente são as que tem maior influência na porosidade. A influência da distância pistola/substrato fica evidenciada comparando a porosidade média (<3%) quando depositado Al a 100 mm (A1 até A4), com os restantes experimentos realizados a 300mm onde a porosidade aumenta até $\sim 5.0\%$. De toda forma a média total de porosidade pode ser considerada muito boa.

A figura 7a mostra que algumas partículas de Al depositadas em substrato sem preaquecimento não tem forma de panqueca homogênea. Na figura 7b, as partículas de Al depositadas em substrato preaquecido, assumem a forma de “panqueca” melhor aderida à textura rugosa do substrato. Nas duas micrografias observa-se a presença de salpicos de alumínio aderidos ao substrato.

Porosidade em cps aluminizados por AT HVOF.

Conforme os resultados da tabela 8 as condições experimentais que apresentam menor nível de porosidade são H1 e H8, sendo que na condição H1 os poros tem área média de $15\mu\text{m}^2$. Da análise dos dados, contata-se que os valores são baixos (média 1,6% nos oito experimentos) e a figura 8 permite observar que o fluxo de nitrogênio é o fator de maior influência na porosidade. Na figura 9 observa-se a estrutura das camadas depositadas pelo processo HVOF.

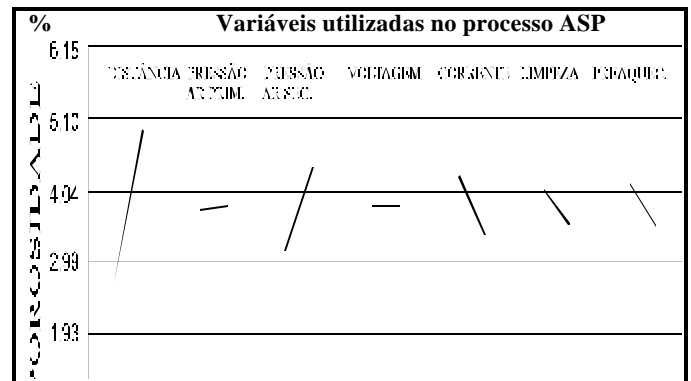


Figura 6. Influência de variáveis da AT ASP sobre a porosidade.

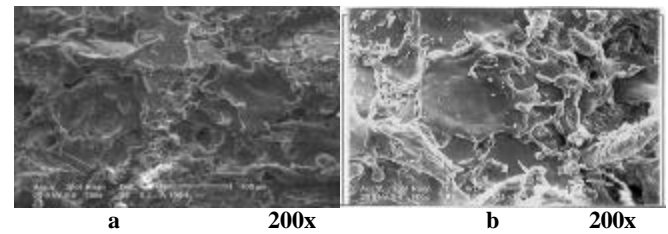


Figura 7. Microfotografias MEV de panquecas depositadas por AT ASP: sobre substratos sem (a) e com preaquecimento a 120 °C (b).

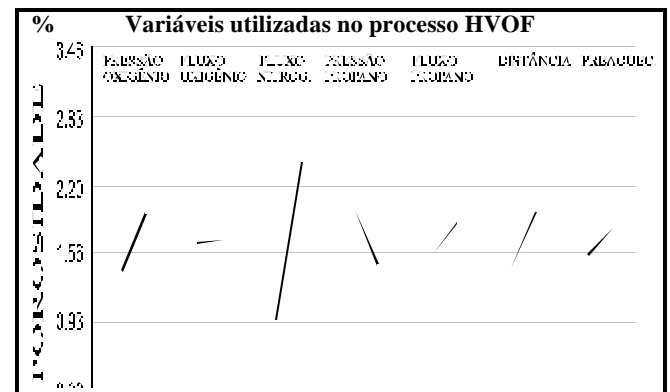


Figura 8. Influência de variáveis de AT HVOF sobre a porosidade.

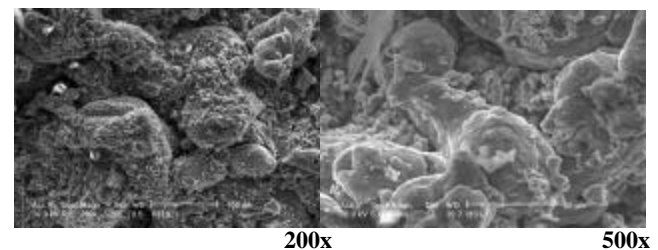


Figura 9. Micrografias MEV de camadas depositadas por AT HVOF. Camadas constituída de partículas maiores e fragmentadas.

Na figura 9 observa-se que as partículas não formam panquecas no impacto com o substrato com e sem preaquecimento. Nota-se que arredor das partículas arredondadas fragmentos muito finos, o que permite deduzir que partículas menores podem fundir e fragmentar-

se ao chocar com a superfície e preencher os espaços entre as partículas maiores e reduzir significativamente a porosidade.

5.3. Aderência por dobramento

Camadas depositadas por ATFS: No cp FS (condição F3) foi verificado que as camadas foram rejeitadas quando não houve o preaquecimento do substrato. Ao contrário, as camadas depositadas sobre substratos preaquecidos foram aprovadas. Estes resultados confirmaram aqueles obtidos com os testes de aderência por tração, onde se verificou que o preaquecimento eleva a aderência.

Camadas depositadas por AT ASP: Neste processo a condição A2, que mostra boa aderência e baixa porosidade. Foi constatado que para camadas depositadas pelo processo ASP não há variação da aderência por dobramento das camadas depositadas sobre substratos sem e com preaquecimento. Neste caso o que pode ser dito é que para o processo ASP o preaquecimento é desnecessário, mesmo que melhore as propriedades de aderência da camada.

Camadas depositadas por AT HVOF: As camadas depositadas por este processo foram as que apresentaram os melhores resultados em relação a aderência por dobramento

5.4. Aderência de revestimentos de Al com camadas de ligação.

Como as camadas de Al depositadas por AT FS mostram baixos valores de aderência por tração quando não é utilizado preaquecimento, recorre-se ao emprego de camadas de ligação, com o objetivo de garantir a aderência do revestimento ao substrato. Para avaliar a eficiência das camadas de ligação foram testadas duas ligas, uma de aço inox martensítico e a liga NiAl, tanto em tração como dobramento. Verifica-se ao analisar os resultados da tabela 9 que a média da aderência é superior às exigida pela normas. Os valores medidos são mínimos porque a ruptura foi predominante no adesivo. Portanto, pode-se afirmar que a utilização das camadas de ligação de inox e NiAl permite dispensar o preaquecimento para obter camadas de Al com aderência adequada.

Tabela 9. Aderência cps aluminizados com camadas de ligação.

Aderência de cps aluminizados com camada de ligação					
Camada de ligação de inox			camada de ligação NiAl		
Cps	MPa	Ruptura	cps	MPa	Ruptura
1	20.9	Co	1	14.8	aderência
2	15.4	Co	2	25.4	adesivo
3	14.6	Ade	3	25.4	adesivo
4	15.0	Ade	4	19.3	adesivo
5	17.2	Co	5	20.8	adesivo
Média	16.6	--	média	21.1	--

Ao comparar os resultados obtidos das tabelas 9 podemos deduzir que as camadas de ligação aderem bem ao substrato e com a camada de alumínio. Nos cps submetidos a dobramento mostraram condição ideal em todos os cps avaliados, permitindo deduzir que o ensaio de aderência por dobramento qualifica os processos de AT sem a utilização de preaquecimento, corroborando os valores obtidos nos ensaios de aderência por tração.

6. Comentários finais e conclusões.

A aplicação do planejamento estatístico experimental proposto por Taguchi permitiu uma análise da influência das variáveis operacionais na qualidade do revestimento de Al depositado pelos três processos de AT e a verificação da combinação mais adequada de parâmetros, dentro da série de testes efetuados:

Processo a chama oxiacetilênica - FS:

No caso da AT FS, com base na avaliação da aderência, as variáveis operacionais mais importantes são o material (arame) e o preaquecimento do substrato.

A variação da distância dentro da faixas utilizadas (100/300 mm), não apresentou importância significativa nos resultados de aderência, fato que representa uma facilidade prática por ser a qualidade dos revestimentos dependente de aplicações manuais.

Processo a arco elétrico - ASP:

No caso do processo a arco elétrico o grau de limpeza Sa2,5 já permite obter aderência superior às exigidas pelas normas AWS e Petrobrás.

A variável distância de projeção pistola/substrato (100 mm) selecionada permite obter níveis de porosidade aproximadamente de 1%, quando da utilização de 300 mm de distância a porosidade medida foi superior (4 a 6 %).

Processo a chama de alta velocidade - HVOF:

- As camadas mostraram os maiores valores de aderência (>36 MPa) e menor porosidade.

- A análise estatística do efeito de variáveis operacionais sobre a aderência foi nesse caso impossibilitada pela falha sempre no adesivo no ensaio de tração.

- A análise estatística, baseada na variação da porosidade, mostrou que o fluxo de nitrogênio é a variável principal afetando essa propriedade.

A variação da distância de projeção, dentro da faixas utilizadas (150/300 mm), não apresentou importância significativa nos resultados de aderência e porosidade.

Agradecimentos: Às empresas Revesteel, Nicrom e METCO de Curitiba/Pr pela colaboração na preparação dos cps aluminizados.

Ao Centro de pesquisa CENPES da Petrobrás/Brasil pelo seu apoio e financiamento desta pesquisa.

7. Referências bibliográficas.

- [1] Bernecki, T.F., "Characterizing Thermal-Spray Coatings", Advanced Materials & Processes, 5, p.23-27, 1992.
- [2] Kreye, H. "State of Development and Prospects of High-Velocity Flame Spray", Welding & Cutting, p. e119-e124, Aug 1990.
- [3] Cortés R. Tese de doutorado. Estudo de revestimentos de Al depositados por três processos de AT para a proteção do aço contra a corrosão marinha. UFSC 1998.
- [4] Phadke, S. Quality Engineering Using Robust Design. AT&T. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 1989.
- [5] Thorpe, M. Thermal Spray. Advanced Materials & Processes / 93
- [6] Hoehne, K. Haftvermittelnde Schichten beim thermischen Spritzen von Metallen. SchweiBtechnik., p.497-499, Berlin 1985.
- [7] Grasmé, D. Arc spraying of Al. Welding and Cutting. 1990.
- [8] American National Standards Institute, American Welding Society. Guide for the Protection of Steel with Thermal Sprayed Coatings of Aluminum and Zinc and Their Alloys and Composites. ANSI/AWS C2.18-93. Miami, USA. April/1993.
- [9] Kreinbuehl, R., KUNZMANN and WILMER, K., Corrosion Protection by Arc Sprayed Al New developments . Swiss Aluminium, Switzerland, 1974.
- [10] Britton, C.R., Flame Spraying With Aluminium and Aluminium Alloys. Revista Aluminium Industry, vol 7/10, December 1988.
- [11] Sahw, A.B., M Moram, P.J. Characterization of the behavior of Zn- Al Thermal Spray Coatings. (212) Corrosion 85, Boston, USA.
- [12] BORBECK, K.D. Market survey of Thermal Spray. Welding and Cutting, p.118 - 8/1990.
- [13] Amin, M. Coating quality in arc spraying-getting it right. The Welding Institute. Bulletin 3, p.52-57, May/June, 1992.