

PROPRIEDADES DOS REVESTIMENTOS DE ALUMÍNIO DEPOSITADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA

METODOLOGIA DE PESQUISA:

- ▶ PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS
 - ▶ ENSAIOS E MEDIÇÕES
 - ▶ RESULTADOS

METODOLOGIA DE PESQUISA

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

PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

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].

Tabela 7. Arranjos ortogonais padrão [23].

Arranjo ortogonal	Número de experimentos	Máximo N ^o . fatores	Máximo número de colunas na matriz			
			2 níveis	3 níveis	4 níveis	5 níveis
L ₄	4	3	3	—	—	—
L ₈	8	7	7	—	—	—
L ₉	9	4	—	4	—	—
L ₁₂	12	11	11	—	—	—
L ₁₆	16	15	15	—	—	—
L' ₁₆	16	5	—	—	5	—
L ₁₈	18	8	1	7	—	—
L ₂₅	25	6	—	—	—	6
L ₂₇	27	13	—	13	—	—
L ₃₂	32	31	31	—	—	—
L' ₃₂	32	10	1	—	9	—
L ₃₆	36	23	11	12	—	—
L' ₃₆	36	16	3	13	—	—
L ₅₀	50	12	1	—	—	11
L ₅₄	54	26	1	25	—	—
L ₆₄	64	63	63	—	—	—
L' ₆₄	64	21	—	—	2	—
L ₈₁	81	40	—	40	—	—

PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

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.

PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Tabela 4. Arranjo ortogonal $OA_8(2^7)$

Exp. No.	COLUNAS DE FATORES						
	A	B	C	D	E	F	G
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1	1
3	0	1	1	0	0	1	1
4	0	1	1	1	1	0	0
5	1	0	1	0	1	0	1
6	1	0	1	1	0	1	0
7	1	1	0	0	1	1	0
8	1	1	0	1	0	0	1

PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Tabela 5. Fatores de controle.

FATORES	PROCESSOS DE ASPERSÃO		
	FS	HVOF	ASP
A	consumível- arame - pó	pressão de oxigênio	distância pistola-substrato
B	temp. preaquecimento	fluxo oxigênio	pressão de ar primário
C	distância pistola-substrato	fluxo nitrogênio	pressão ar secundário
D	fluxo oxigênio	pressão propano	voltagem
E	fluxo acetileno	fluxo propano	Corrente
F	pressão ar comprimido	distância pistola-substrato	grau limpeza substrato
G	fluxo ar comprimido	temp. preaquecimento	temp. preaquecimento

PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Tabela 6. Parâmetros fixos.

FS	HVOF	ASP
Rugosidade substrato	Rugosidade substrato	Rugosidade substrato
Limpeza - Sa3	Limpeza - Sa3	---
Abrasivo	Abrasivo	Abrasivo
Consumível (pó/arame de Al)	Consumível (pó de Al)	Consumível (arame de Al)
Espessura da camada	Espessura da camada	Espessura da camada

A rugosidade estabelecida corresponde na faixa de 60 a 80 μm .

A espessura da camada a ser depositada deve de ser no mínimo de 250 μm , espessura que, de acordo com experimentação prévia, não apresenta porosidade passante , além de ser recomendada pela literatura especializada.

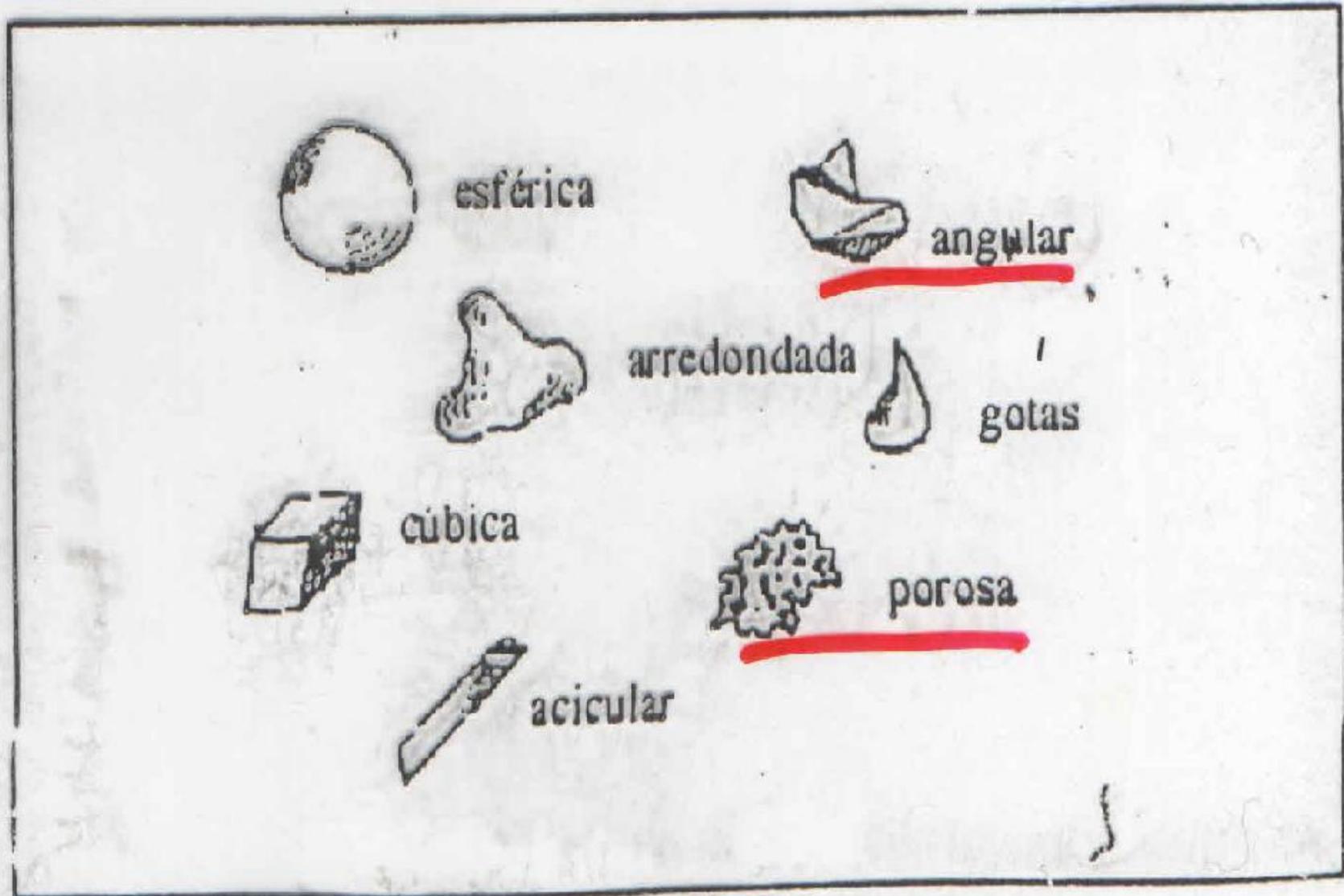


Figura 7 - Formas de partículas [34].

(*) Características de abrasivos para jateamento.

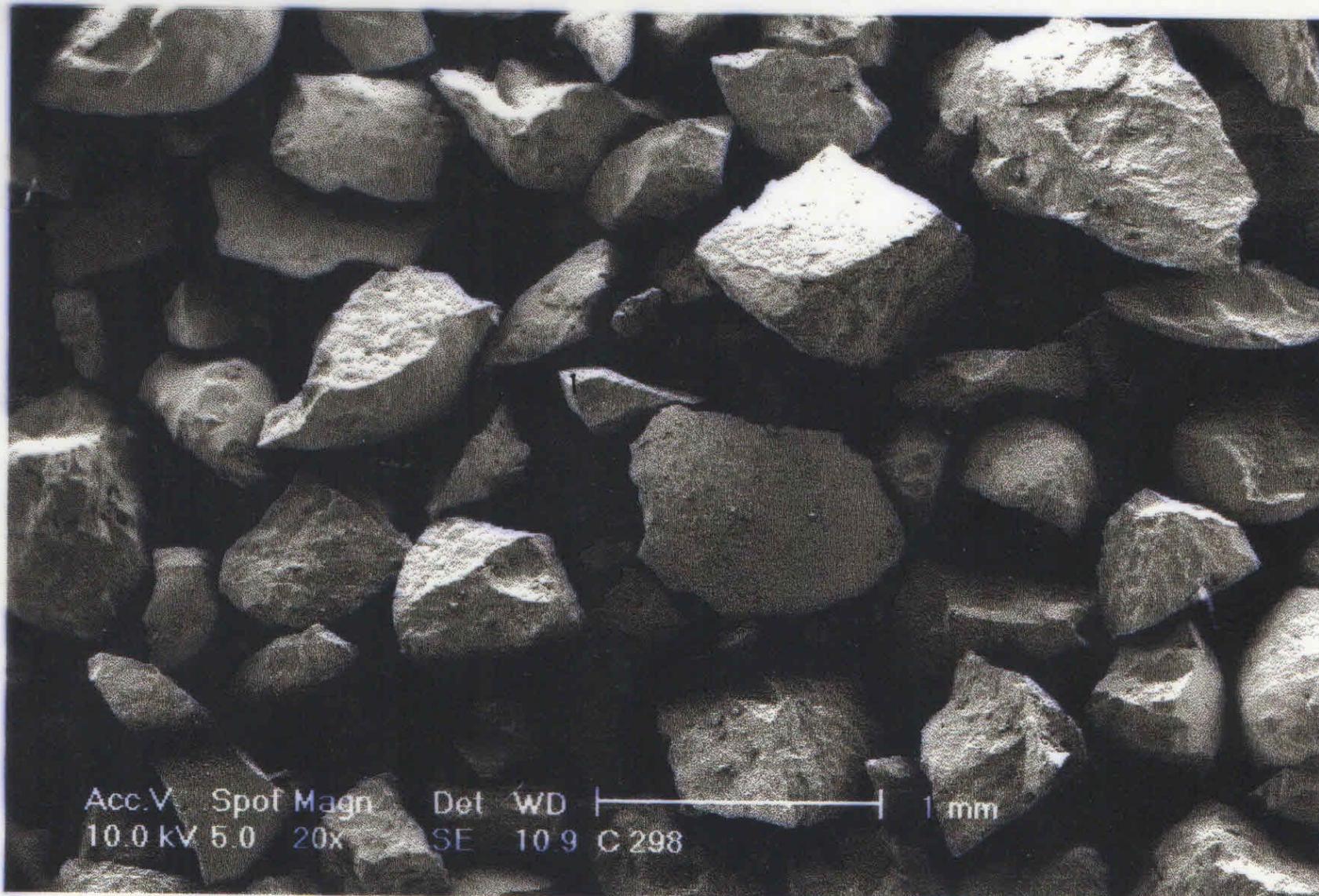
Tabela 2 - Característica de abrasivos para jateamento [13]

Abrasivo	Componente (maior %)	Forma	Massa Espec.	Dureza (Rc)
• Granalha Aço	Ferro	Angular	765	100
Limalha Ferro	Ferro	Angular	740	97
• Óxido Alum. Natural	Alumínio	Cúbica	380	76
• Óxido Alum. Recup.	Alumínio	Cúbica	376	66
Granada	Ferro, Silica	Cúbica	409	54
Escória Mineral	Silica, Al, Fe	Cúbica	279	39
→ Areia	Silica	Cúbica	261	23
→ Areia	Silica	Angular	263	10
Carboneto Silicose	Carb. Silicose	Bloco	381	32

Massa Específica em 100 g/cm³

PERMITE JATAR
PEÇAS COM ATÉ 1 m
DE COMPRIMENTO



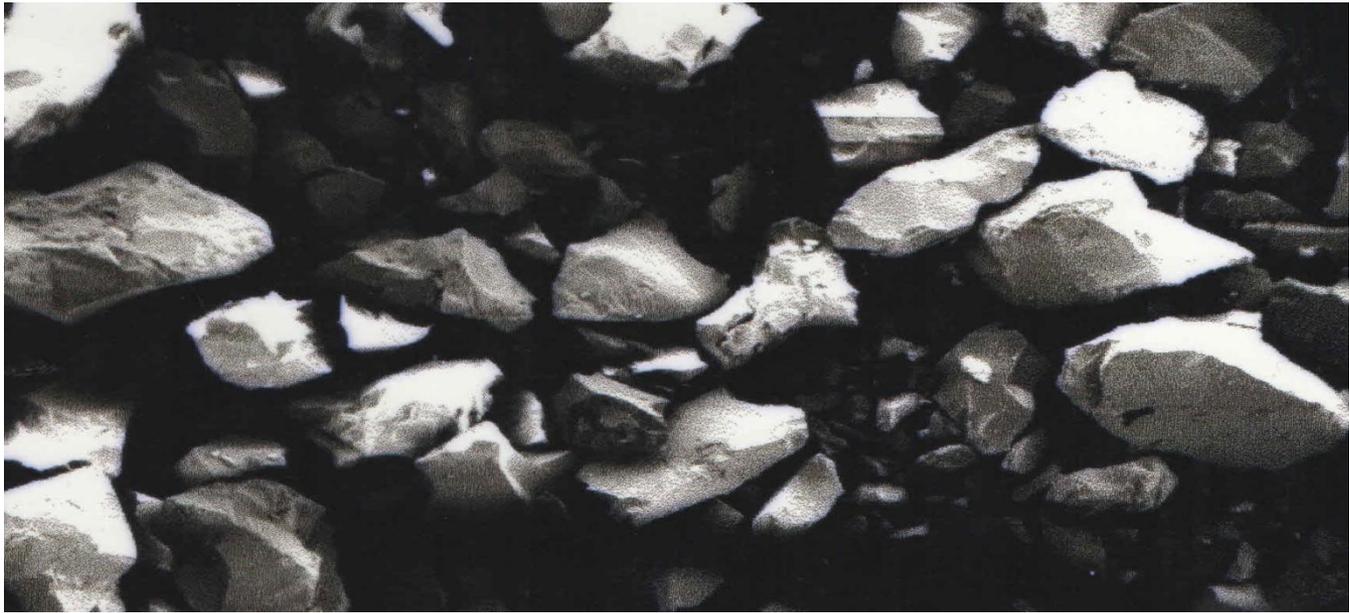


OXIDO DE ALUMÍNIO



Acc V Spot Magn Det WD |-----| 1 mm
10.0 kV 5.0 20x SE 10.0 C

ESCÓRIA DE COBRE



PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Tabela 8. Aluminização pelo processo a chama oxiacetilênica - FS.

Fator	Nível 1	Nível 2
Matéria prima	arame	pó
Preaquecimento	Temperatura ambiente	120 °C
Distância pistola-substrato	100 mm	300 mm
Fluxo oxigênio	40 [*1]	50 [*1]
Fluxo acetileno	35 [*2]	45 [*2]
Pressão ar comprimido	80 psi	100 psi
Fluxo ar comprimido	50 [*1]	70 [*1]

[*1] 40 = 77,7 pés³/h / 50 = 93,4 pés³/h # [*2] 35 = 36,4 pés³/h / 45 = 47,3 pés³/h

Tabela 9. Aluminização pelo processo a arco elétrico - ASP.

Fator	Nível 1	Nível 2
Distância pistola-substrato	100 mm	300 mm
Pressão ar primário	70 psi	80 psi
Pressão ar secundário	50 psi	60 psi
Voltagem	32 v	40 v
Corrente	120 A	160 A
Grau de limpeza	Sa 2,5	Sa3
preaquecimento	Temperatura ambiente	120 °C

Tabela 10. Aluminização pelo processo a chama de alta velocidade - HVOF.

Fator	Nível 1	Nível 2
Preaquecimento	Temperatura ambiente	120 °C
Distância pistola-substrato	150 mm	300 mm
Fluxo nitrogênio	70 [*]	80 [*]
Pressão oxigênio	150 psi	180 psi
Fluxo oxigênio	42 [FMR]	50 [FMR]
Pressão propano	100 psi	120 psi
Fluxo propano	40 [FMR]	48 [FMR]

[1 FMR Oxigênio]=6,3 SLPM / [1 FMR Propano]=1,7 SLPM (SLPM = Standard liter per minute)

[*] = unidade do fluxo de nitrogênio especificado no manual da pistola DJ 2004 a 125 psi de pressão.

PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

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

PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

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

PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

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.

ENSAIOS E MEDIÇÕES

4. Procedimentos de AT e caracterização das camadas.

Materiais: Substrato de aço carbono 1020; Al \varnothing 3,2 mm (METCO MAL-12), pó de Al granulometria -90+45 microns (METCO 54NS); aço inox martensítico \varnothing 3,2 mm (METCOLOY # 2) e liga NiAl \varnothing 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, 380 μ m foi a espessura mínima adotada, enquanto para os ensaios de aderência por dobramento foram de 175 μ m a 250 μ m. 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.

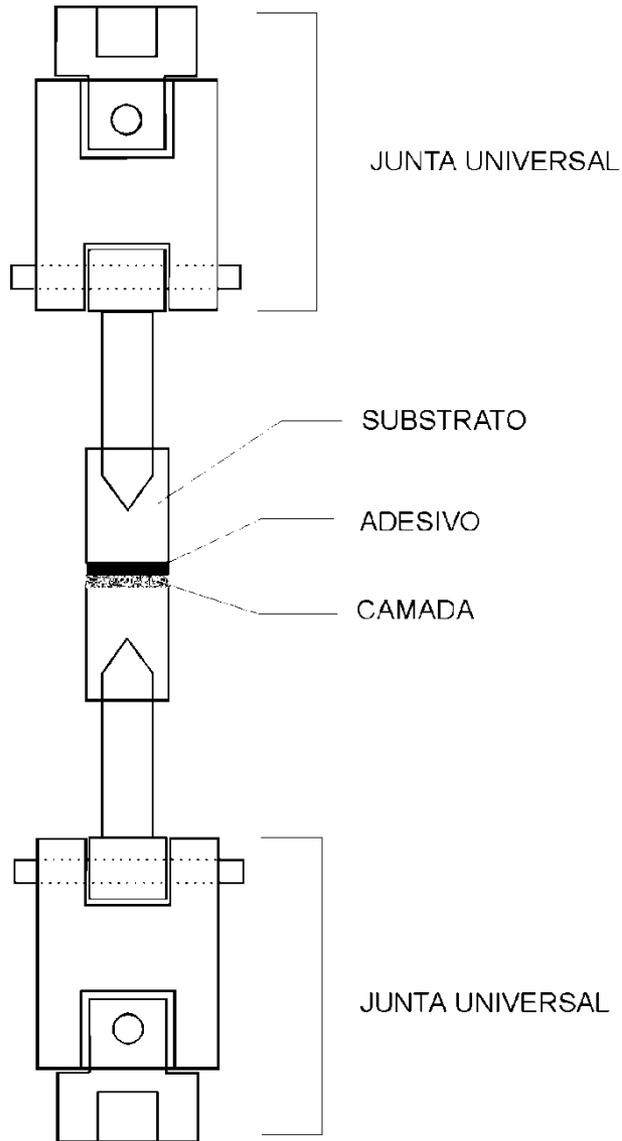
ENSAIOS E MEDIÇÕES

Medição da aderência por tração: Para a análise quantitativa foi utilizado o teste proposto pela norma ASTM G633/79. 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.

ENSAIOS E MEDIÇÕES



RESULTADOS

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).

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

RESULTADOS



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

RESULTADOS

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

RESULTADOS

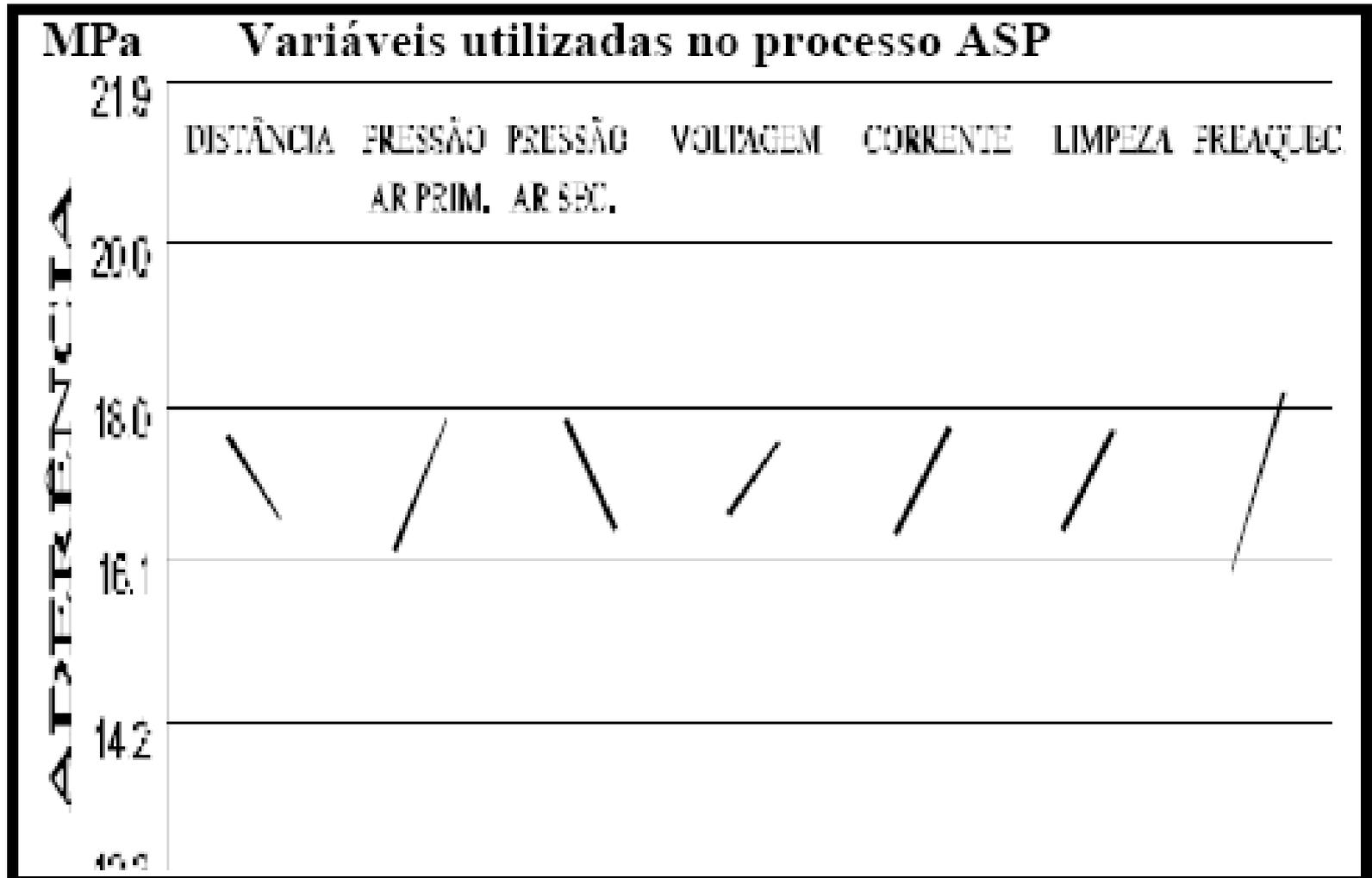


Figura 3. Influência das variáveis na aderência no processo AT ASP.

RESULTADOS

Tabela 7 - Aderência de camadas depositadas por HVOF

AT	Espessura [μm]		Aderência [MPa]	Ruptura
	Média	desvio	média	Predominante
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

RESULTADOS

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.

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

RESULTADOS

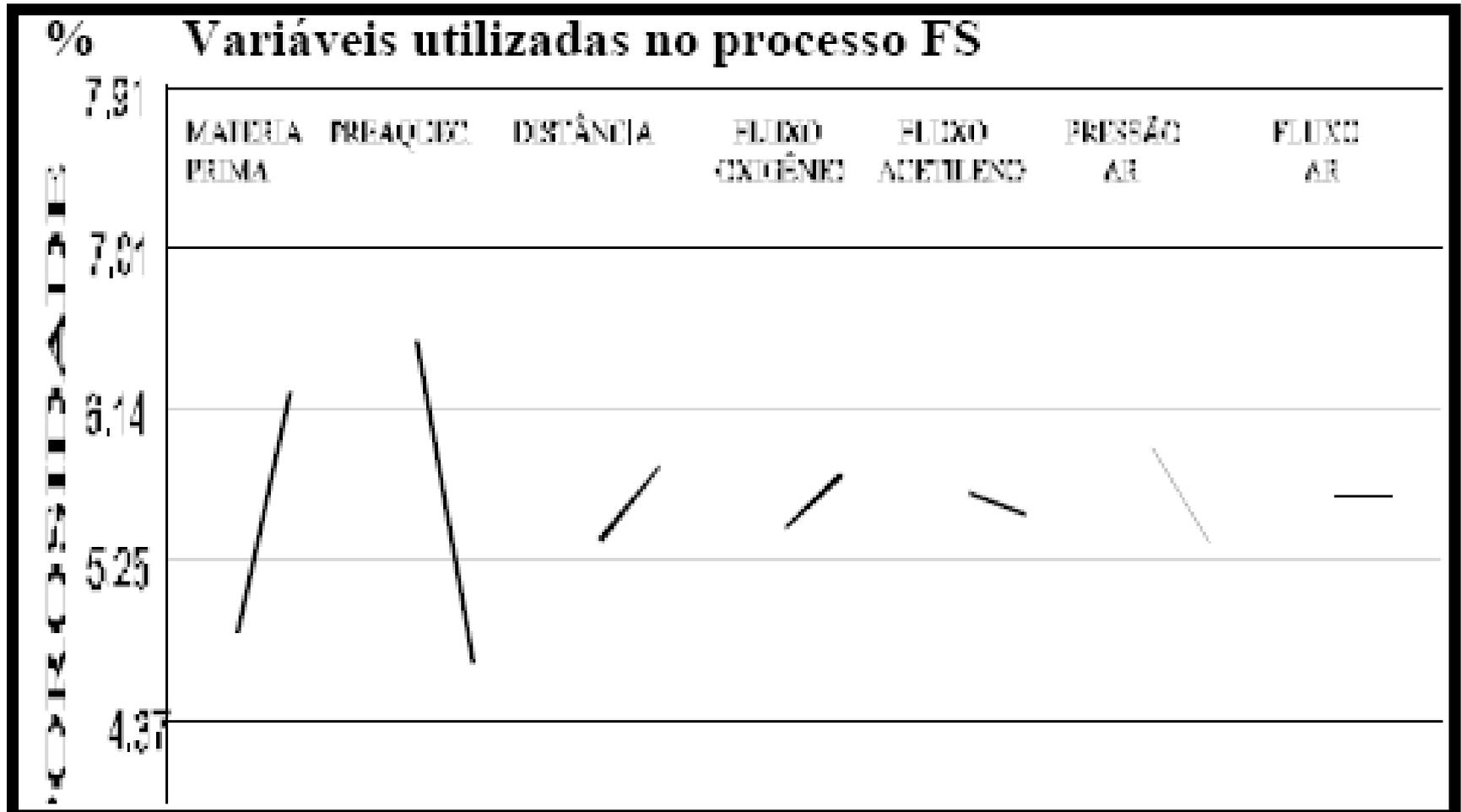


Figura 4. Influência de variáveis do processo FS sobre a porosidade.

RESULTADOS

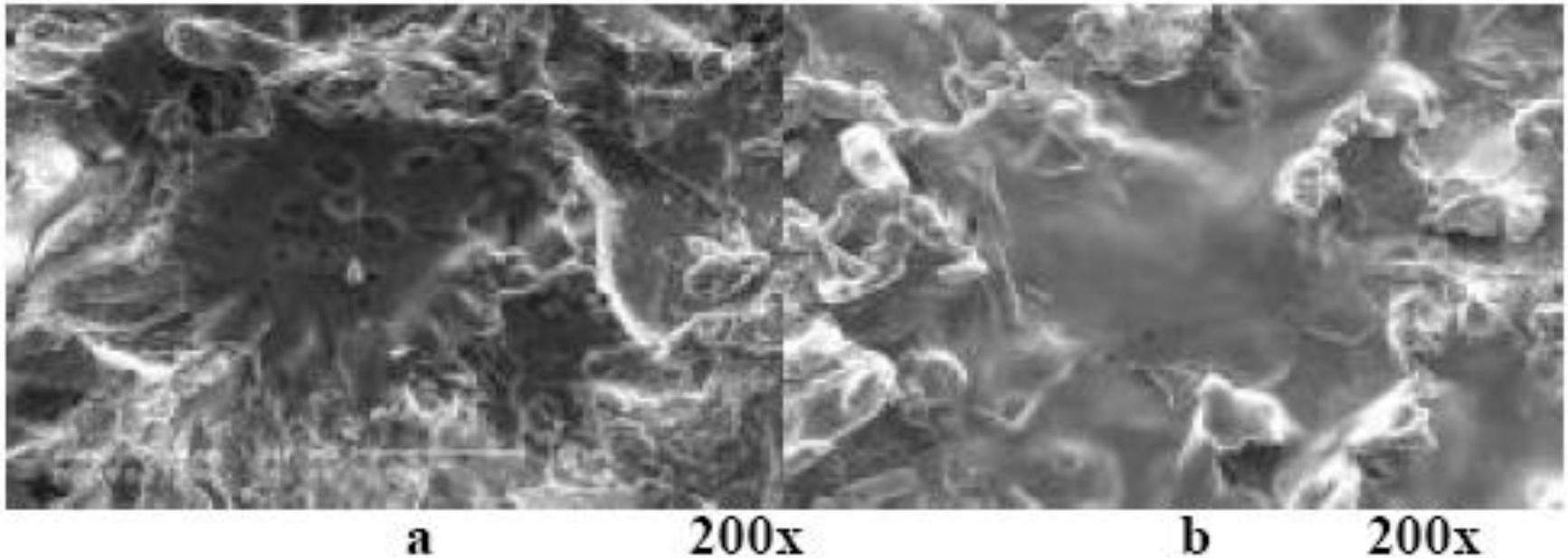


Figura 5. Microfotografias MEV de panquecas depositadas por ATFS em substratos sem (a) e com preaquecimento a 120 °C (b).

RESULTADOS

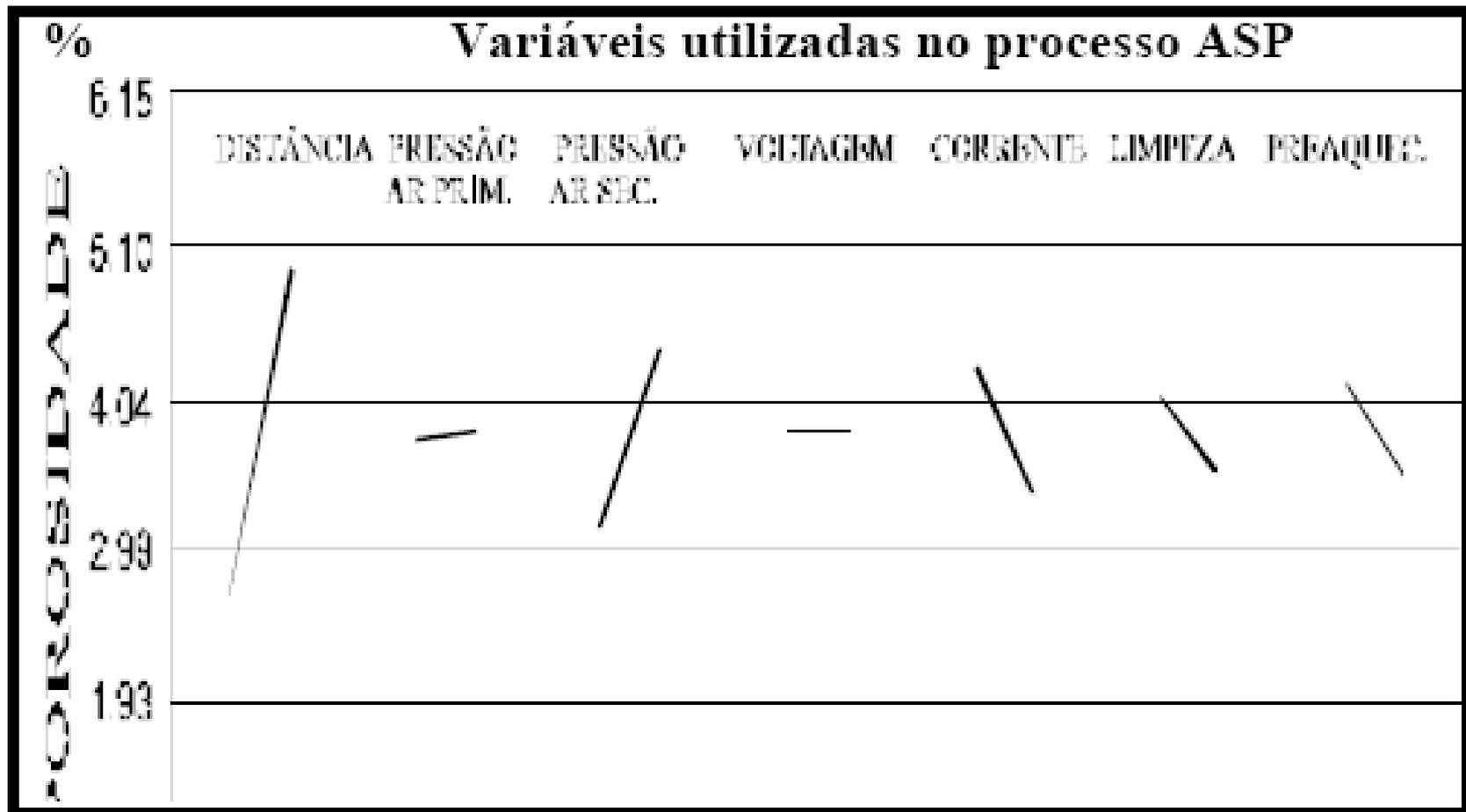


Figura 6. Influência de variáveis da AT ASP sobre a porosidade.

RESULTADOS

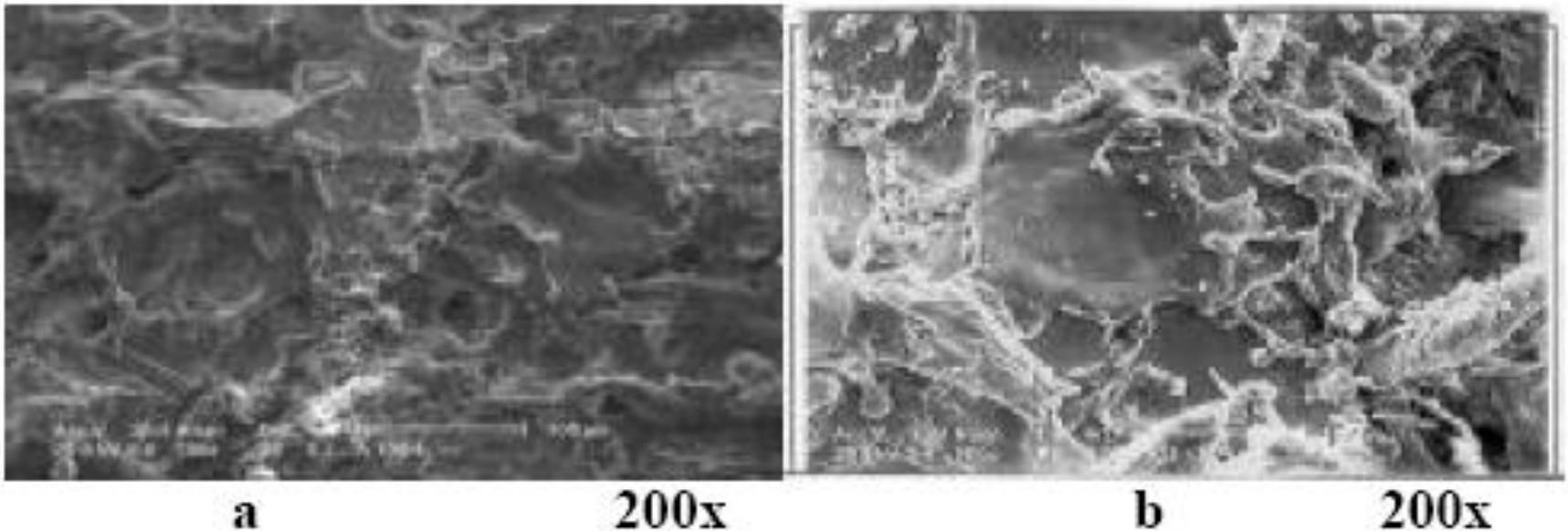


Figura 7. Microfotografias MEV de panquecas depositadas por AT ASP: sobre substratos sem (a) e com preaquecimento a 120 °C (b).

RESULTADOS

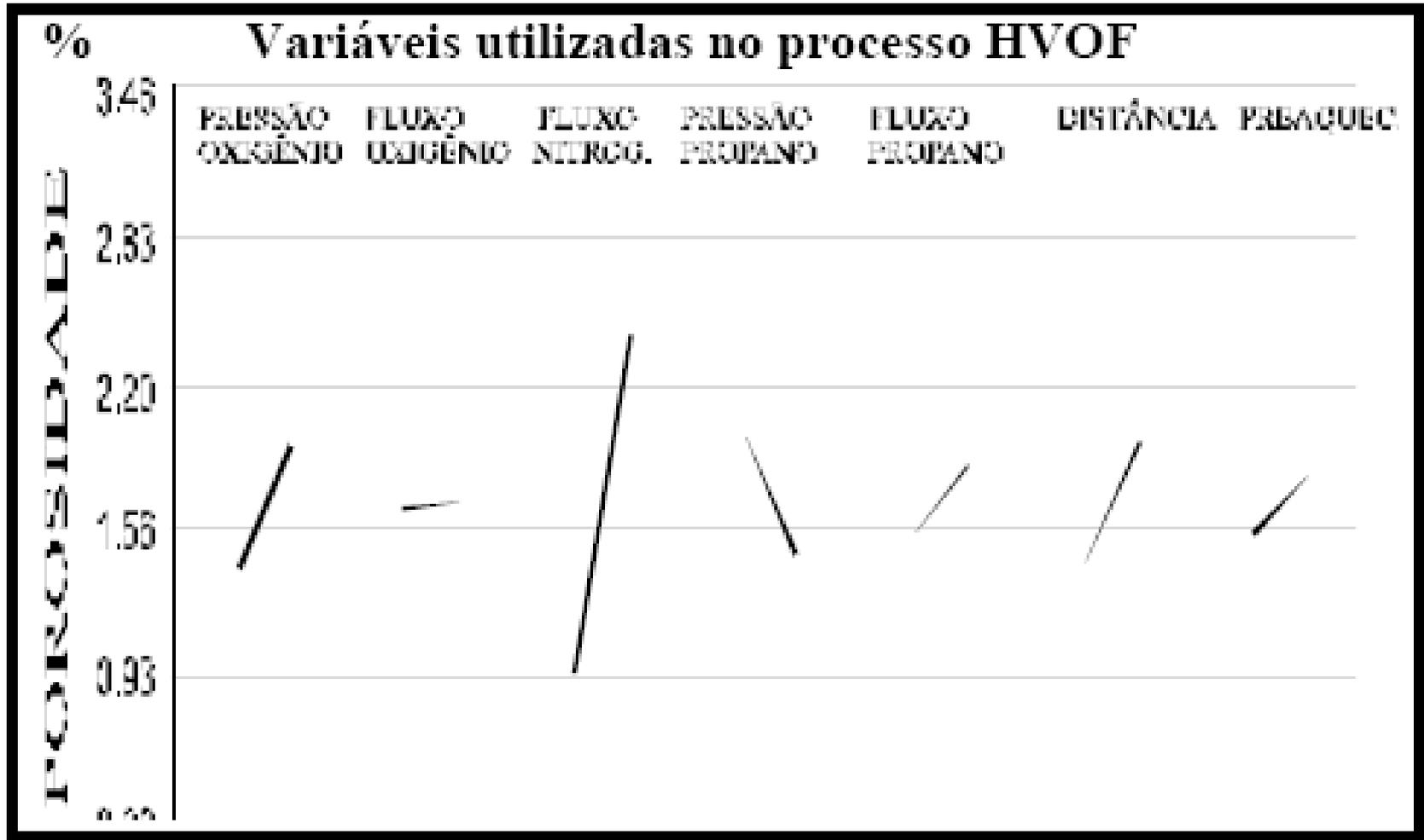
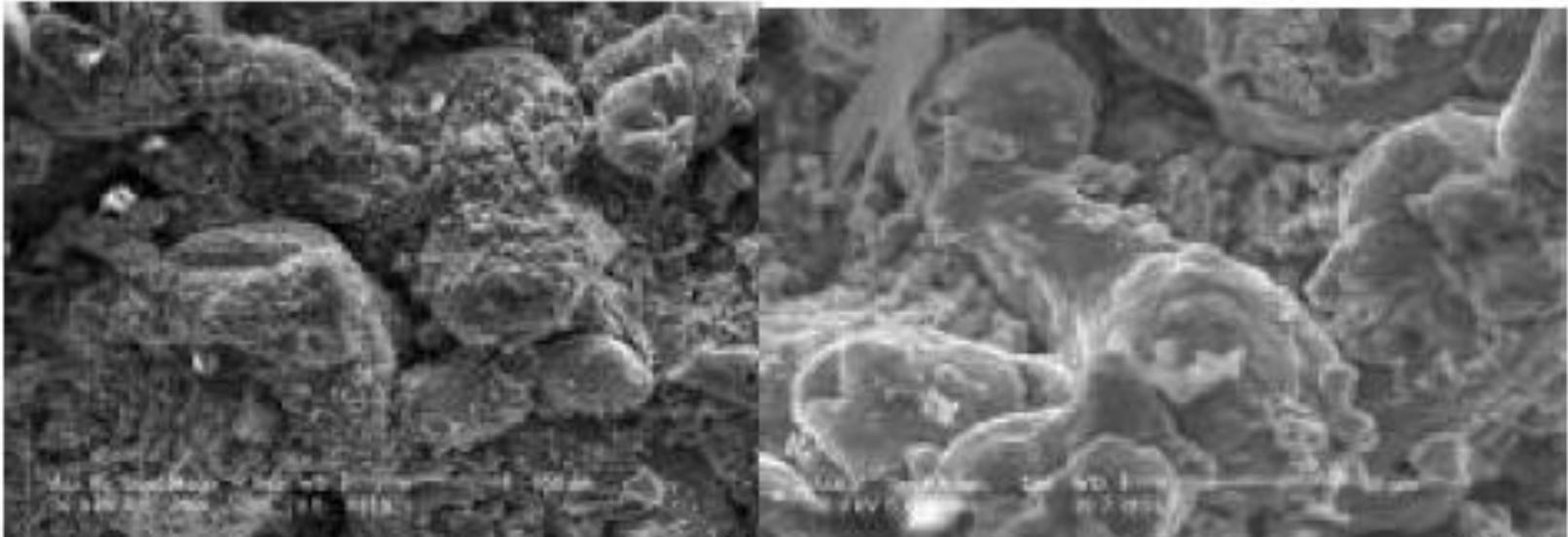


Figura 8. Influência de variáveis de AT HVOF sobre a porosidade.

RESULTADOS



200x

500x

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

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 das 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.

Comentários finais e conclusões.

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 %).

Comentários finais e conclusões.

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.

- fim