

INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO BOCAL DA PISTOLA DE ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO NA MICROESTRUTURA DE REVESTIMENTOS DO AÇO AWS 309 L

Guber E. Guerrero¹, Ramón S. Paredes², Dmitri Vlassov³, A. Pukasiewicz⁴

^{1,2,3} Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR

Centro politécnico – caixa postal 19011 CEP 81531-990 Curitiba – PR

⁴UTFPR-Campus Ponta Grossa e Aluno do curso de Pós-Graduação em Eng. UFPR

¹guberg@gmail.com

RESUMO: Neste trabalho são apresentados os resultados da influência do bocal da pistola de aspersão térmica por arco elétrico no revestimento de aço inoxidável AWS 309L T1. Foi feito um estudo gasodinâmico, segundo a teoria de escoamentos isoentrópicos, do comportamento do bocal para avaliar os parâmetros de saída do ar: pressão, temperatura, densidade e velocidade. A análise demonstrou a viabilidade de melhorar o projeto do bocal e as condições de escoamento do gás com a mudança na geometria. Posteriormente foi realizado o projeto de fabricação do novo bocal e foram depositados revestimentos de aço inoxidável com os mesmos parâmetros iniciais e realizados ensaios de dobramento, medição de porosidade e do teor de óxidos. Os resultados mostraram que o revestimento depositado com o bocal modificado aumentou a porosidade e diminui fração volumétrica de óxidos. Portanto, pode-se concluir que a mudança de bocal produz alterações na qualidade dos revestimentos depositados.

Palavras chaves: Aspersão térmica, geometria de bocal, aço inoxidável.

1. INTRODUÇÃO:

O processo de aspersão a arco elétrico consiste na fusão de dois eletrodos consumíveis em forma de arame, os quais são energizados por uma fonte de corrente contínua e avançam de maneira constante até se encontrarem e formarem um arco voltaico. O material fundido é expelido por um jato de ar comprimido, o qual se encarrega de otimiza-lo, projetando as partículas sobre um substrato preparado.

Dentro das principais aplicações dos revestimentos aspergidos por arco elétrico encontram-se componentes submetidos a níveis elevados de corrosão, desgaste por abrasão^{1,2,3} e, em algumas aplicações especiais podem ser usados gases inertes como argônio e hélio com o intuito de diminuir a oxidação⁶. Os revestimentos depositados com arco elétrico são normalmente menos porosos e mais densos que os depositados com os processos a chama¹, isto devido a terem uma maior velocidade da partícula, entre 100 a 300 m/s e uma maior temperatura podendo chegar até 5000 °C no arco elétrico^{2,4}.

2. ESTUDO GASODINÂMICO:

A motivação principal para a realização deste trabalho surgiu devido à realização de um trabalho em parceria com o Instituto de Pesquisa para o Desenvolvimento LACTEC, o qual consiste em determinar a viabilidade de depositar revestimentos aspergidos termicamente pelo processo a arco elétrico sobre regiões cavitadas nas pás das turbinas de unidades geradoras de energia elétrica da Companhia Paranaense de energia elétrica, COPEL.

Ao realizar o trabalho encontraram-se dificuldades ao revestir áreas pequenas e profundas, devido à elevada dispersão do jato de metal fundido o qual originavam altas taxa de deposição e baixa eficiência no reparo. Com o intuito de otimizar este tipo de reparos foi realizado um estudo gasodinâmico em relação ao escoamento do ar no bocal. Inicialmente foi realizada uma pesquisa na literatura das possíveis mudanças na geometria do bocal e foi encontrada a fórmula de Vitochinsky (A) a qual pode ser utilizada para bocais convergentes e assumindo um escoamento isoentrópico do ar no bocal.⁵

$$r = \frac{r_s}{\sqrt{1 - \left[1 - \left(\frac{r_s}{r_e} \right)^2 \right] \left[\frac{\left(1 - \frac{x^2}{l^2} \right)^2}{\left(1 + \frac{x^2}{l^2} \right)^3} \right]}}, \text{ onde:} \quad (A)$$

r_s = raio de saída do bocal [mm].

r_e = raio de entrada do bocal [mm].

x = distância axial do bocal [mm].

l = comprimento do bocal [mm].

É importante ressaltar que tanto os raios de entrada como de saída do bocal e o comprimento do mesmo permaneceram iguais ao bocal original, foi modificado apenas o perfil interno do bocal tal e como é apresentado na Figura 1.

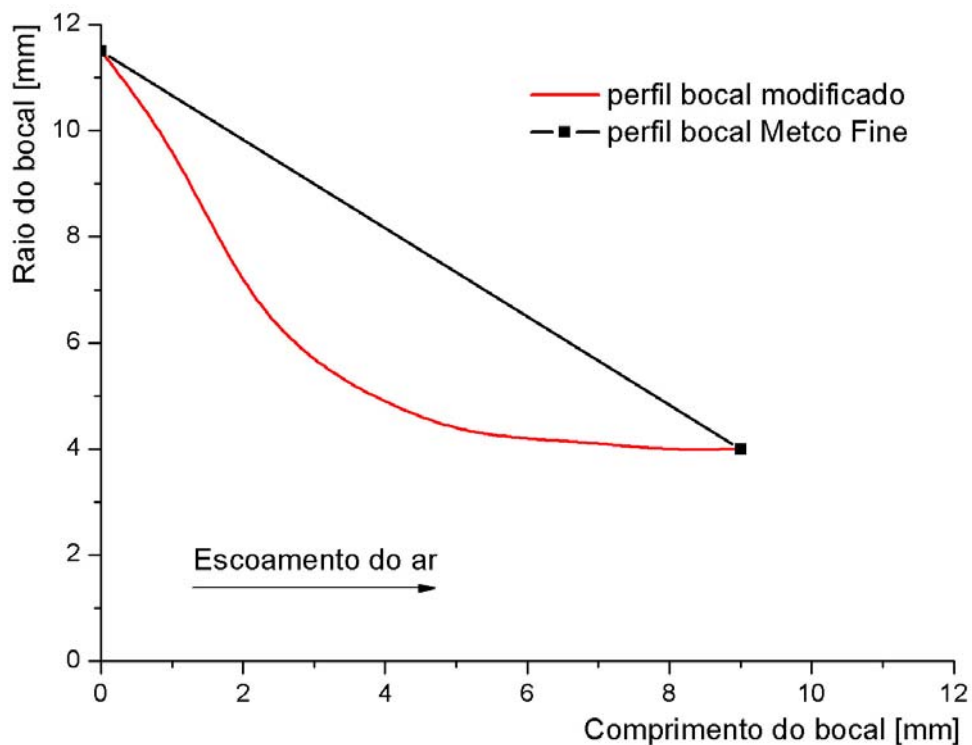


Figura 1. Perfil dos bocais de aspersão térmica analisados.

Como pode ser observado, a configuração do novo perfil do bocal tem como função concentrar e direcionar o jato de ar comprimido. Um análise numérico das propriedades gasodinâmicas do ar ao passar pelo bocal Metco Fine⁷ e ao passar pelo perfil modificado permitiu determinar a viabilidade da construção do novo bocal.

A usinagem do bocal modificado foi realizada no laboratório de usinagem da Universidade Federal do Paraná, UFPR. Após a conclusão do processo de usinagem foram testados os dois bocais em condições similares de operação e demonstrou visualmente uma concentração do jato de aspensão tal e como apresentam na Figura 2.

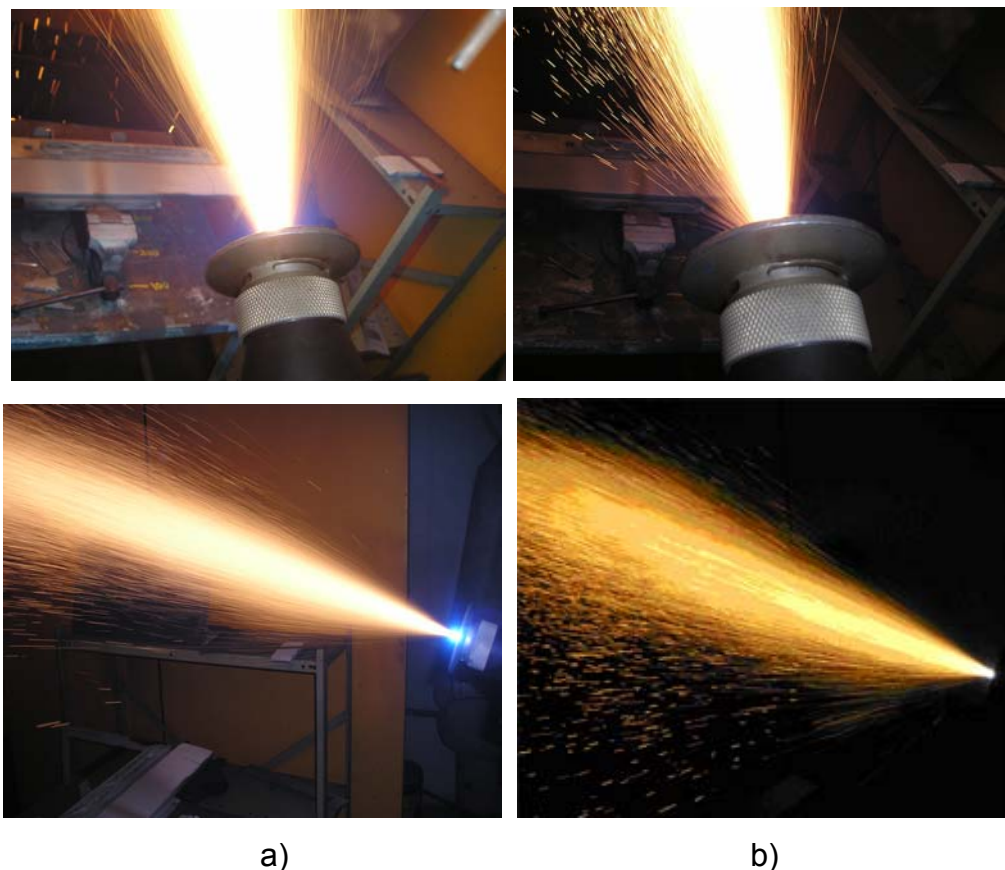


Figura 2. Aspecto visual da aspensão a arco elétrico: a) bocal modificado, b) bocal Metco Fine.

3. MATERIAIS E MÉTODOS:

Nos experimentos do presente trabalho foram utilizados substratos de aço ABNT 1020 em dimensões de 50 x 75 mm e com espessuras de 1,25 mm para os ensaios de dobramento e 3,2 mm para análise metalográfica. Antes de dar início à metalização, os corpos de prova foram jateados com óxido de alumínio branco (Alundum 36) com o intuito de limpar a superfície, deixando-a completamente branca e de textura uniforme livre de óxidos, graxas, carepa de laminação e produto de corrosão. Durante este processo manteve-se constante um ângulo de jateamento de

90° contra a superfície e uma distância do jato ao substrato de 150 mm aproximadamente, tal como recomendado pela Norma Petrobrás 2568.

Os resíduos de abrasivo gerados durante o jateamento foram removidos com jato de ar comprimido antes da metalização. Nos ensaios foi utilizada a máquina de aspersão térmica VALUARC 300E da Sulzer Metco⁷, mostrada na Figura 3.



Figura 3. Máquina de aspersão térmica sulzer metco VALUARC 300E

A metalização dos corpos de prova foi feita com bobinas de aço inoxidável AWS 309LT1, desenvolvida pela SANDVIK STEEL em bitolas de 1,6 mm em passes uniformes e sempre tentando sobrepor cerca de 1/3 do passe para garantir a uniformidade do revestimento. Na tabela 1 é apresentada a composição química.

Tabela 1. Composição (%em peso) do aço AWS 309L T1⁸

Material	Arame	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Si	% Ni
309LT1	Tubular	<0.020	0.4	1.8	23.5	13.5	< 0.020

Foram depositadas camadas com a mesma direção e sentido de aspersão, visando evitar a formação de defeitos ocasionados pelo procedimento de aspersão. Durante a metalização foram mantidos os parâmetros de tensão, corrente e uma

distância de aspersão para ambos bocais. A Tabela 2 indica os parâmetros utilizados durante os ensaios.

Tabela 2. Parâmetros da deposição ASP utilizados durante a aplicação

Parâmetro	Valores empregados		
Corrente (A)	180		
Tensão (v)	30		
Pressão do ar-comprimido (kPa)	276	345	414
Distância pistola-peça (mm)	200		

Os ensaios de dobramento foram realizados numa prensa hidráulica disposta de um mandril de 13 mm de diâmetro, como recomendado pela Norma Petrobrás N-2568. Adicionalmente, foram feitas seções transversais das camadas aspergidas sobre os corpos de prova de maior espessura, 3,2 mm, as quais foram embutidas, lixadas, polidas e, depois, fotografadas em microscópio ótico.

A imagem obtida foi inserida no software de caracterização de imagem CLEMEX PE, para a medição das porcentagens dos poros, óxidos e fases metálicas presentes no revestimento.

A análise de poros, óxidos e fases foram realizadas através de tons de cinza e substituição por tons RGB. Onde os poros são pontos pretos, óxidos cinza escuro e a fase metálica apresenta-se em cinza claro. Posterior a estes ensaios, foram realizadas aspersões sobre uma coluna de água, com o intuito de solidificar as partículas de metal fundido, sendo coletadas posteriormente e analisadas em microscópio ótico. Foi utilizado o software CLEMEX PE, de análise de imagem para determinar o tamanho meio das partículas em diferentes condições de pressão e mantendo constantes os parâmetros de aspersão, tal e como apresentado na tabela 2.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES:

Na tabela 3 são apresentados os resultados dos ensaios de dobramento realizados sobre chapas de 1,25 mm de espessura, cabe ressaltar que os corpos de prova foram agrupados em relação a sua rugosidade, tentando assim manter um padrão de análise e desta forma não influenciar nos resultados.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de dobramento.

Bocal	Pressão(psi)	Ra	Ry	condição
Metco Fine	40	5,76	34,03	Ideal*
		6,64	38,64	ideal
	50	6,22	35,99	Ideal*
		6,37	35,78	Ideal*
	60	5,69	32,70	Ideal*
		6,53	35,89	Ideal*
Modificado	40	5,98	32,53	Ideal*
		6,15	38,14	Ideal
	50	6,13	35,27	Ideal
		6,86	39,47	Ideal
	60	5,77	33,62	Ideal
		5,17	31,83	Ideal

* Trincas pequenas observadas com lupa 10x.

Os resultados mostram que todos os corpos de prova não apresentaram indícios de delaminação, trincamento grosseiro ou descolamento do revestimento. Trincas pequenas foram observadas com lupa de aumento de 10x unicamente nos revestimentos depositados com o bocal da Metco, mas segundo norma Petrobrás¹ não são determinantes para considerar o revestimento dobrado como marginal.

Após a realização dos ensaios de dobramento procedeu-se a depositar revestimentos sobre os corpos de prova de espessura maior, 3,2 mm, com o intuito de caracterizar o número de poros, óxidos e fase metálica, tendo em consideração o agrupamento dos corpos de prova em relação à rugosidade do substrato tal e como apresentado na tabela 4.

A Figura 4, apresenta macrografias das camadas depositadas e analisadas pelo software CLEMEX PE, onde podem ser observadas as porcentagens dos poros, óxidos e fases metálicas presentes no revestimento para ambos bocais da pistola de aspersão.

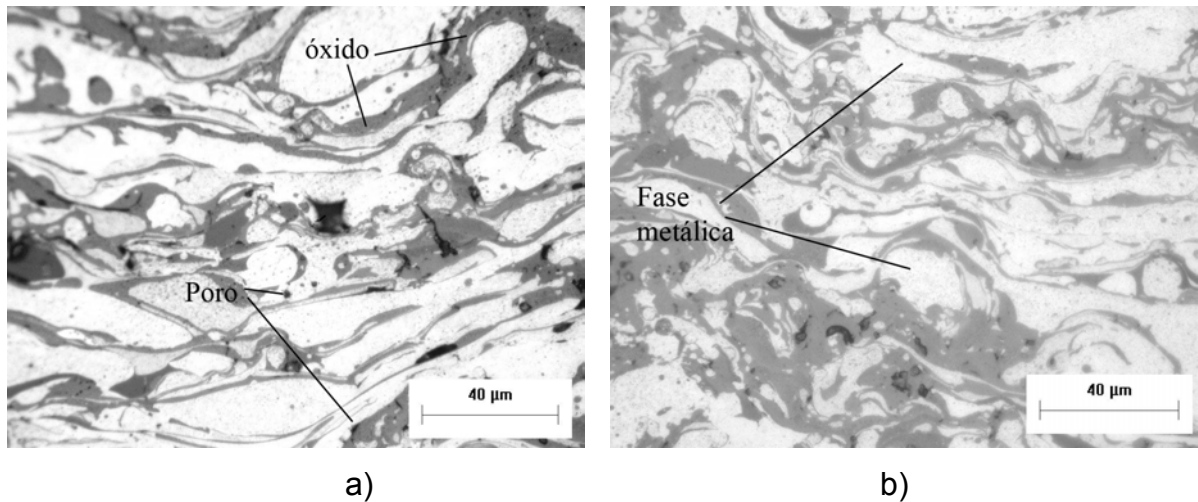


Figura 4. Macrografia do revestimento aspergido depositado por arco elétrico:
 a) Bocal modificado, b) Bocal Metco Fine.

Tabela 4. Caracterização dos revestimentos depositados.

Bocal	Pressão (psi)	Rugosidade substrato		Porosidade (%)	Óxidos (%)	Fase Metálica (%)	Rugosidade mínima revestimento	
		Ra	Ry				Ra	Ry
Metco Fine	40	5,6	33,7	1,7±0,5	23,3±5,3	75±4,8	14,3	74,2
	50	5,8	32,7	1,9±0,7	30,4±4,9	67,7±5	12,9	67,0
	60	5,5	33,7	0,5±0,2	27,4±5,9	72,1±5,9	11,1	60,8
modificado	40	4,8	29,3	2,2±1,8	15,8±3,5	82±3,9	17,9	84,2
	50	5,4	31,0	2,4±0,8	26,9±3,6	70,7±3,1	13,3	66,4
	60	5,2	29,3	1,9±0,8	34,3±4,6	63,8±4,7	12,4	63,7

Pode ser observado que a variação de pressão influencia nas características do revestimento. Um aumento na pressão indica uma diminuição da quantidade de poros e um aumento de óxidos presentes, válido para ambos bocais. Os revestimentos depositados pelo processo a arco elétrico apresentam altos teores de óxidos devido à reação de oxidação da poça de metal fundido com o passo do jato de ar comprimido.

O bocal modificado apresentou uma maior quantidade de poros e uma menor quantidade de óxidos. Uma maior presença de óxidos ocasionaria uma maior dureza do revestimento de tal forma que a resistência à abrasão e ao desgaste seriam

melhoradas, mas por outra parte, uma elevada presença de óxidos diminui a resistência do revestimento a qualquer processo de conformação, além de apresentar maior ductilidade, comprovado pela ausência de trincas no ensaio de dobramento. Adicionalmente, óxidos de extremada dureza ocasionam problemas durante a usinagem⁶.

Ensaio adicionais foram realizados com o intuito de determinar o motivo da presença de menores teores de óxidos e maiores teores de poros nos revestimentos depositados com o bocal modificado. Para o qual foram efetuadas aspersões sobre uma coluna d'água e coletadas as partículas aspergidas, veja Figura 5 e posteriormente foram levadas a uma estufa para sua secagem.

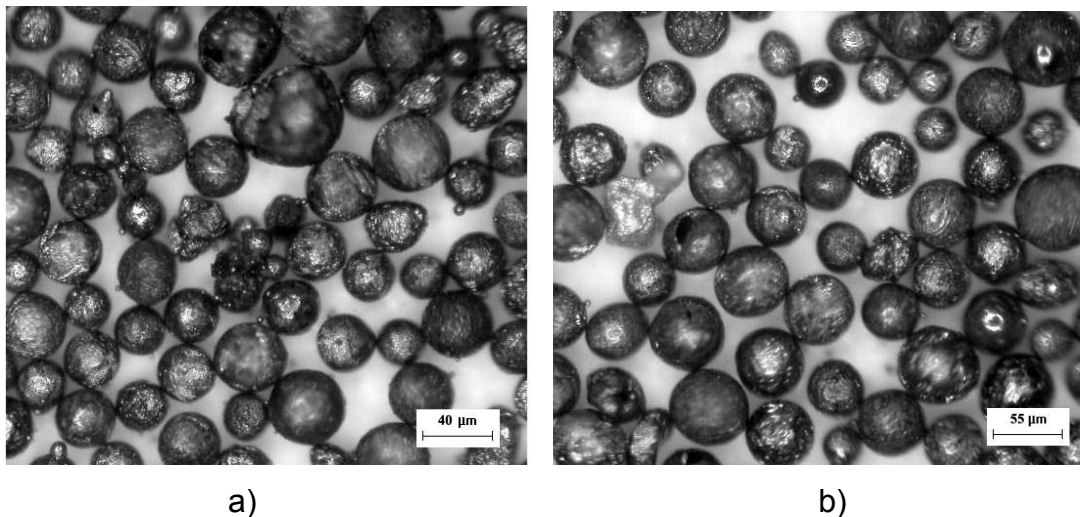


Figura 5. Micrografia das partículas aspergidas a 60 psi: a) bocal Metco Fine, b) bocal modificado.

Na Figura 6, observa-se que o aumento da pressão do ar diminui o tamanho médio das partículas aspergidas e observa-se também que o bocal modificado apresentou partículas de maior diâmetro, o qual pode explicar a presença de menores teores de óxidos e maior porosidade nos revestimentos aspergidos com este bocal.

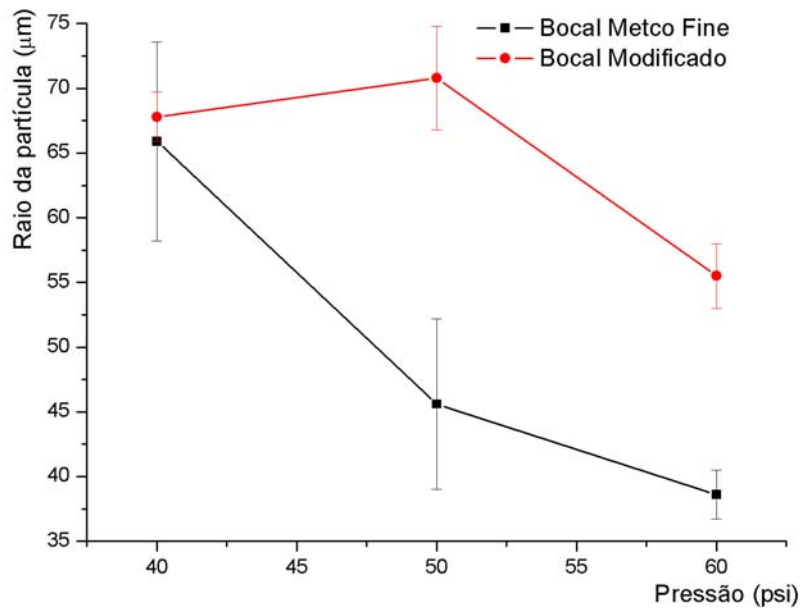


Figura 6. Variação do tamanho da partícula aspergida em função da pressão de atomização.

Os revestimentos por aspersão são formados pelo impacto, deformação e rápida solidificação destas partículas formando uma estrutura lamelar. As menores partículas fundidas projetadas com energia cinética elevada e tem uma maior moliabilidade e deformam-se mais facilmente no impacto aumentando a densidade do revestimento e reduzindo a porosidade.

No entanto, ao possuir uma maior relação área superficial/volume reagem mais facilmente com o oxigênio e oxidam mais que as partículas de tamanhos maiores. Por outro lado, as partículas menores têm uma maior velocidade, um menor tempo de vôo e menores tempos para a reação de oxidação.

Então, pode-se afirmar que uma correta seleção dos parâmetros de aspersão pode ocasionar uma maior o menor quantidade de poros e óxidos presentes no revestimento.

Um estudo mais detalhado do bocal e do procedimento de deposição deverá ser feito com o intuito de determinar as condições de operação ideais para o mesmo, já que foi demonstrado que a modificação do perfil do bocal ocasiona variações nas propriedades do revestimento.

5. CONCLUSÕES.

O bocal de aspersão térmica tem uma forte influência sobre a porosidade e o teor de óxidos.

A modificação do bocal permitiu reduzir a região de transferência metálica.

A equação de Vitochinsky foi adequada para o cálculo que fomentou mudanças no bocal de aspersão térmica a arco elétrico.

6. AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Paraná, que possibilitou a realização dos ensaios em seus laboratórios.

À equipe de trabalho do laboratório de aspersão térmica e soldagens especiais LABATS, pelo apoio técnico e humano.

À CNPq/ RHA E Fomento Tecnológico pela bolsa.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Congresso

1. PUKASIEWICZ, A. G. M.; CAPRA, André Ricardo ; CHANDELIER, Joceli da Guia ; PAREDES, Ramón Sigifredo Cortés . **Caracterização de revestimentos resistentes à cavitação depositados por aspersão térmica**. In: XXXI CONSOLDA - Congresso Nacional de Soldagem, 2005, São Paulo. Anais do XXXI CONSOLDA - Congresso Nacional de Soldagem, 2005.
2. PAREDES, R. S. C.; PADILHA, Hélio ; HENKE, Sérgio Luiz . **DESENVOLVIMENTO DE REVESTIMENTOS DE COBRE, BRONZE E ALUMÍNIO-NIQUEL DEPOSITADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA SOBRE SUBSTRATO DE ALUMÍNIO PARA MELHORAR O DESEMPENHO DE CONEXÕES ELÉTRICAS**. In: 25º Congresso Brasileiro de Corrosão, 2005, Salvador BA. 8ª Conferência sobre Tecnologia e Equipamentos. Rio de Janeiro : Associação Brasileira de Corrosão, 2005. v. CD-ROM

Norma:

3. Norma Petrobrás **N-2568 Revestimentos anticorrosivos aplicados por aspersão térmica**. Janeiro 2003.

Livro:

4. LIMA, C.; TREVISAN, R. **Aspersão térmica fundamentos e aplicações**. Artliber editora Ltda, São Paulo, 2002.
5. ABRAMOVITCH, G. V. **Gasodinâmica aplicada** Tradução do russo, Editorial Ciência, Moscou 1984.

Artigo de periódico eletrônico:

6. GEDZEVICIUS, A. V. Analysis of wire arc spraying process variables on coatings properties. **Journal of Materials Processings Technology** v.175, 2006.

Manual técnico de equipamento:

7. Sulzer Metco ValuArc™ Electric arc spray system, Hicksville, New York, April 1998.

Página de Internet:

8. <http://www.smt.sandvik.com> acesso em: 20 de agosto 2006.

8. ABSTRACT

In this work, the results of the influence of the nozzle of the gun of arc spray process in the stainless steel 309 coatings deposit are presented. A gas dynamic study was made, according to theory of isentropic fluids, the behavior of the nozzle to evaluate the parameters of exit of air: pressure, temperature, density and speed. It analyzes demonstrated it the viability to improve the project of the nozzle and the conditions of draining of the gas with the change in geometry. Later the project of manufacture of the new nozzle was carried through and had been deposited stainless steel coatings with the same parameters initial and carried through assays test, measurement of porosity and the oxide text. The results had shown that the coatings deposited with the modified nozzle increased the porosity and diminishes the oxide text. Therefore, it can be concluded that the nozzle change produces exchanges in the quality of deposited coatings.

Keywords: arc spraying, nozzle configuration, coating steel 309