



AVALIAÇÃO DO DESGASTE POR ABRASÃO DO AÇO API 5L X65 REVESTIDO COM NÍOBIO POR ASPERSÃO TÉRMICA A PLASMA EM RELAÇÃO AO REVESTIMENTO DE INCONEL 625 POR SOLDAGEM¹

*Felipe Piccinini Motta²
Cesar Augusto Krischer³
Roberto Moreira Schroeder³
Iduivirges Lourdes Müller⁴
Célia de Fraga Malfatti⁴*

Resumo

O objetivo deste trabalho foi avaliar e caracterizar o comportamento mecânico em desgaste do aço API 5L X65 revestido com nióbio em comparação ao desempenho em relação aos revestimentos empregados na indústria de óleo e gás, como os de ligas de inconel 625. O revestimento de nióbio foi obtido por processo de aspersão térmica a plasma de arco não transferido e o revestimento de inconel 625 foi obtido por soldagem com eletrodo revestido. A resistência ao desgaste por abrasão foi avaliada em um tribômetro CTER, a rugosidade e o volume de material desgastado foram determinados através de perfilometria. Os revestimentos obtidos também foram caracterizados quanto à morfologia por microscopia eletrônica de varredura e microscopia óptica.

Palavras-chave: Desgaste; Revestimento de Inconel 625; Revestimento de nióbio.

EVALUATION OF WEAR BY ABRASION ON API 5L X65 STEEL COATED WITH NIOBIUM BY PLASMA THERMAL SPRAY IN RELATION TO COATING BY WELDING OF INCONEL 625

Abstract

The aim of this study was to evaluate and characterize the mechanical wear in the API 5L X65 steel coated with niobium in comparison to performance in relation to coatings used in oil and gas industry, such as Inconel 625 alloy. The coating of niobium was obtained by plasma thermal spray process and the coating of Inconel 625 was obtained by shielded metal arc welding. The resistance to abrasion was evaluated in a tribometer CETR, roughness and volume of material removed was determined by profilometry. The coatings obtained were also characterized for their morphology by scanning electron microscopy and optical microscopy.

Key words: Wear, Inconel 625 coating; Niobium coating.

¹ Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

² Mestrando – LAPEC/PPGEM/UFRGS.

³ Graduando – LAPEC/UFRGS.

⁴ Professora – LAPEC/PPGEM/UFRGS.

1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios na exploração de petróleo em águas profundas é a obtenção de sistemas de transporte de canalização de produção entre o poço e a plataforma, capazes de suportar o movimento das correntes e tensões geradas.⁽¹⁾ A seleção de revestimentos para aplicação nestas condições, tais como os aplicados em risers flexíveis e diversos componentes destes sistemas de produção deve atender também aos requisitos de resistência à corrosão e ao desgaste abrasivo pelo contato entre diversos equipamentos presentes ao longo das tubulações. Neste sentido, a aplicação de revestimentos de nióbio vem surgindo como alternativa para aplicações que requeiram materiais resistentes a estas condições críticas de operação e que além disso possuam e mantenham boas propriedades mecânicas em trabalho.⁽²⁾

O interesse pela aplicação de nióbio deve-se a formação de um filme aderente e principalmente resistente à corrosão, promovendo o aprimoramento das técnicas e dos métodos de aspersão térmica. A boa ductilidade, a capacidade de resistência à corrosão e à temperaturas elevadas do nióbio, somados à dureza elevada quando obtido por aspersão térmica desperta o interesse no aprimoramento da aplicação deste metal.⁽³⁾ No que se refere a resistência ao desgaste, destaca-se o mecanismo como resultado da interação entre superfícies que possuem diferentes durezas, sendo que uma superfície mais dura, ou a presença de partículas duras no material, quando em contato com outro corpo de menor dureza, pode provocar o desgaste deste contra-corpo.⁽⁴⁾

O objetivo deste trabalho foi comparar a resistência ao desgaste do revestimento de nióbio em relação ao revestimento de Inconel 625, obtidos por aspersão térmica a plasma e por soldagem com eletrodo revestido, respectivamente.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Os revestimentos foram depositados sobre amostras retangulares de medidas 120 x 20 x 11,5 mm, usinadas no sentido longitudinal de um tubo sem costura de aço API 5L X 65. A composição química deste aço e dos revestimentos empregados estão na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do metal de base e dos revestimentos empregados

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
API X-65	0,12	0,24	1,36	0,008	0,003	0,02	0,04	0,01	0,05
E NiCrMo-3	0,04	0,50	0,60	-	-	22,0	9,0	61,5	-
Nb (pó)	0,008	-	-	-	0,002	-	-	-	-
	Co	Cu	Nb	Ti	V	Fe	O	H	N
API X-65	-	-	0,04	0,001	0,05	98,1	-	-	-
E NiCrMo-3	-	-	3,30	-	-	3,0			
Nb (pó)	-	-	98,9	0,002	-		0,24	0,002	2,6

O revestimento de nióbio foi obtido por aspersão térmica a plasma a partir do pó do metal, de granulometria média 23 µm e partículas alongadas e irregulares. O pó foi previamente seco em estufa sob temperatura de 80°C, por 30 minutos. Como preparação superficial do substrato procedeu-se com limpeza superficial grau Sa2 das amostras como usinadas, além de jateamento abrasivo com alumina e pré-aquecimento com o auxílio da pistola de aspersão, sendo a temperatura objetivada em 120°C, monitorada com auxílio de um pirômetro. A aspersão térmica foi realizada

através de um equipamento de plasma spray Sulzer Metco da empresa TAP (Manutenção e Engenharia). Os parâmetros de processo foram 500A de corrente elétrica, distância entre o substrato e a tocha de 10 cm, vazão do pó de 15 g/min e vazão do gás argônio de 2,0 l/min. Utilizou-se pequena quantidade de hidrogênio no gás de ionização como complemento para a energia de ionização do sistema.

Para o revestimento de Inconel 625, empregou-se o processo de soldagem por eletrodo revestido com o eletrodo tipo básico de baixo hidrogênio NiCrMo-3, de diâmetro 3,25 mm. Como corrente de soldagem utilizou-se 80 A, com polaridade positiva no eletrodo e velocidade de aproximadamente 10 cm/min.

Após a obtenção dos revestimentos, as amostras foram submetidas ao desgaste abrasivo em um tribômetro CETR, mostrado na Figura 1, pelo atrito gerado pelo contato de uma esfera de alumina que desliza sobre a superfície do revestimento, gerando uma trilha de desgaste. As superfícies foram ensaiadas sem preparação superficial de lixamento ou polimento, mas procurou-se as regiões mais planas e menos rugosas, inspecionadas visualmente, para a construção da trilha de desgaste. Os parâmetros do ensaio de desgaste foram fixados conforme Tabela 1. Procurou-se analisar o desgaste pela comparação do volume da trilha formada em cada superfície, através de um perfilômetro de contato, gerando imagens em 3D. Avaliou-se também o coeficiente de atrito e a profundidade de desgaste dos revestimentos. Foi realizado a caracterização microestrutural dos revestimentos por microscopia óptica e a microdureza Vickers.

Tabela 2. Parâmetros do ensaio de desgaste

Carga [N]	2
Frequencia [Hz]	2
Curso [mm]	2
Duração do ensaio [h]	0,5



Figura 1. Tribômetro empregado nos ensaios de desgaste.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados experimentais obtidos para a rugosidade das superfícies antes da realização da trilha de desgaste. Os resultados mostraram uma rugosidade alta para o revestimento de nióbio em comparação ao de Inconel, principalmente em relação ao valor de R_y , caracterizando uma superfície bastante irregular.

Tabela 3. Valores de rugosidade dos revestimentos

Rugosidade	Ra (μm)	Ry (μm)
Revestimento A: Inconel 625	0,71	11,00
Revestimento B: Nb	5,63	64,00

Em razão da rugosidade mais acentuada do revestimento B, algumas amostras foram lixadas até a lixa 600 para minimizar a irregularidade superficial quando comparado ao revestimento A, tentando não comprometer a baixa espessura do revestimento. Na tabela 4, pode-se ver que a rugosidade média diminuiu apenas de 5,63 μm para 4,32 μm mas a redução de Ry foi mais acentuada, de 64,00 μm para 20,00 μm . Porém, em razão da alta rugosidade da superfície jateada, realizada na preparação superficial para obtenção do revestimento B, preferiu-se excluir esta prática de lixar a superfície aspergida, como maior garantia de realização da trilha integralmente sobre o nióbio, ao invés de algum pico de aspereza remanescente do processo de jateamento.

Tabela 4. Valores de rugosidade dos revestimentos

Rugosidade	Ra (μm)	Ry (μm)
Revestimento Nb lixado (#600)	4,32	20,00
Aço API 5L X65 jateado	5,72	41,53

A micrografias mostradas na Figura 2 mostram as partículas de nióbio depositadas pela aspersão térmica a plasma, tipicamente superfícies rugosas em razão da formação de lamelas depositadas uma sobre as outras no estado fundido ou semi-fundido. A espessura deste revestimento foi de 100 μm com desvio padrão de 0,09, apresentando algumas regiões não preenchidas ou de vazios, além de trincamentos. Os parâmetros influenciáveis para produzir estes defeitos podem ser atribuídos a corrente de aspersão insuficiente para garantir uma adequada plasticidade as partículas aspergidas, bem como a vazão de pó e um adequado controle de temperatura de pré-aquecimento.

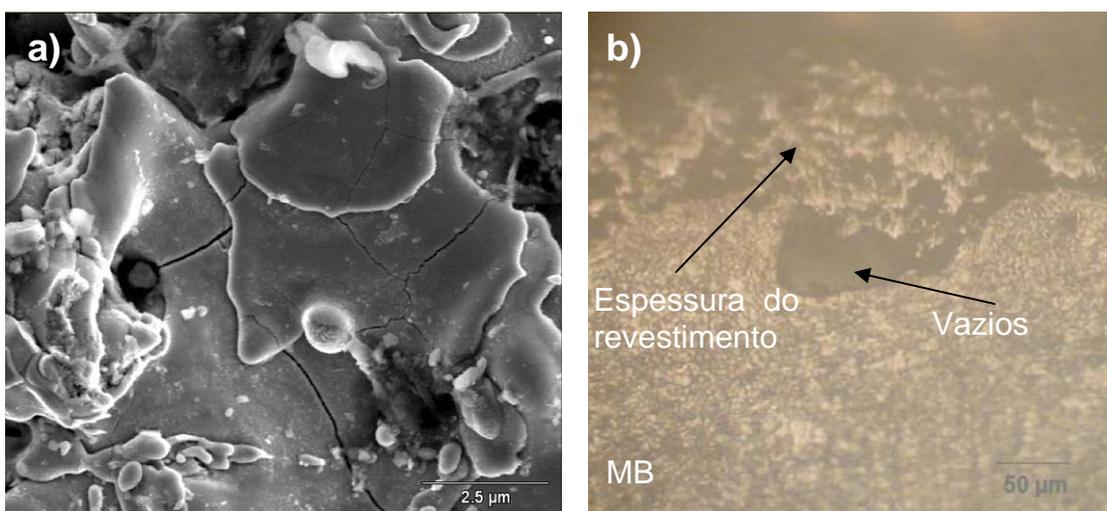


Figura 2. Micrografias do revestimento de nióbio. a) MEV de topo e b) Microscopia óptica transversal, ataque Nital 2%

O revestimento de Inconel depositado por soldagem com eletrodo revestido caracteriza-se pela fusão total do metal de solda, gerando uma superfície uniforme. Este processo é tipicamente empregado em reparos de juntas de tubulações, principalmente nos passes de enchimento. No entanto o nivelamento do

revestimento depende da habilidade do soldador, sendo mais comumente empregado por processos semi-automáticos e mais produtivos como MIG, com deslocamento da tocha controlado. Na Figura 3 é possível verificar a micrografia transversal, onde tipicamente a solda do aço baixa liga X-65 com eletrodos de Inconel 625 será totalmente austenítico até altos níveis de diluição,⁽⁵⁾ podendo no entanto formar zonas parcialmente diluídas próximas a linha de fusão entre o metal de base e o metal fundido.

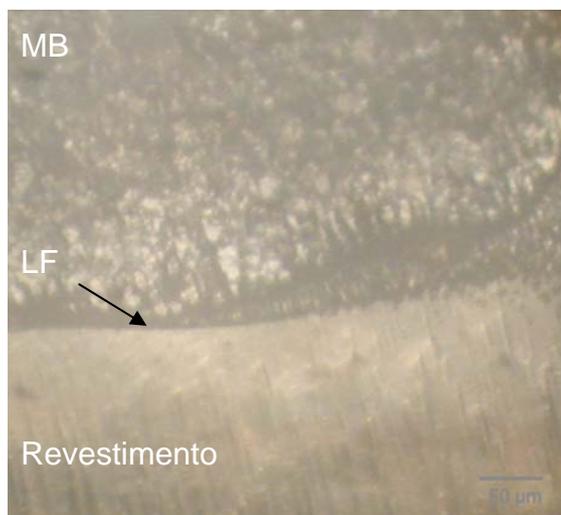


Figura 3. Micrografia transversal obtida por microscopia óptica do Inconel 625, ataque Nital 2%.

Estas zonas aproximam-se, se analisadas no diagrama de schaeffler, da região martensítica, onde a dureza torna-se elevada, podendo comprometer a integridade de juntas de soldagem dissimilar destes materiais. No entanto, no âmbito deste trabalho, não se torna necessário analisar estas alterações microestruturais. As trilhas de desgaste podem ser observadas na Figura 4.

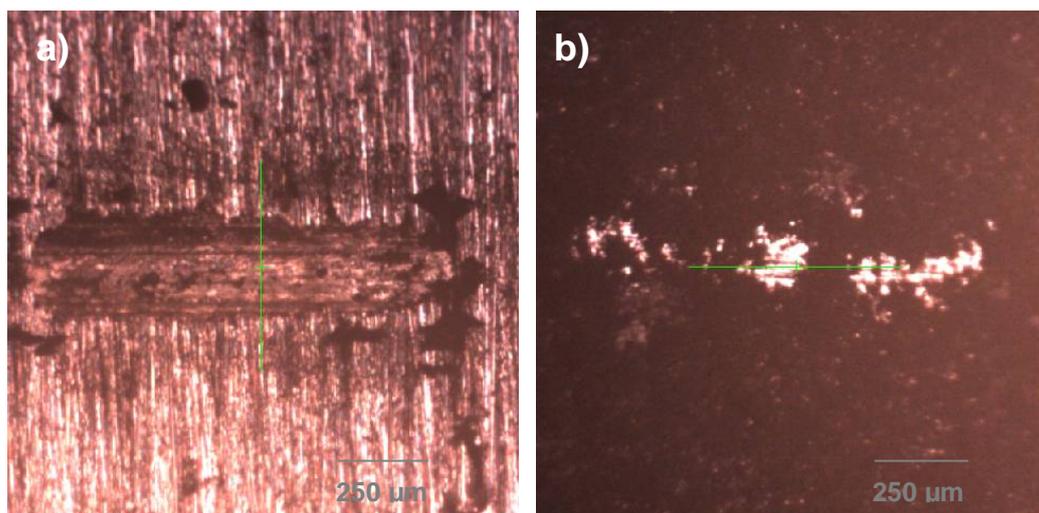


Figura 4. Imagens da trilha de desgaste. a) Revestimento de Inconel 625 b) Revestimento de Nb.

Observa-se que o revestimento B, da figura b não sofreu desgaste com geometria bem definida como o da figura a que pertence ao revestimento A. Por característica, o Inconel 625 apresenta alto valor de limite de resistência mas ao mesmo tempo o limite de escoamento não é considerado alto, sendo em torno de 450 MPa,⁽⁶⁾

apresentando, como em geral apresentam as ligas de níquel e microestruturas austeníticas, um grande encruamento e alongamento em ensaio de tração. O nióbio é um metal dúctil, mas apresenta valores elevados de dureza no estado aspergido por processos térmicos. Entretanto, pela rugosidade excessiva do revestimento obtido, espera-se uma menor área de contato com a esfera de alumina, minimizando em parte esta propriedade de dureza elevada.

As imagens da Tabela 3 permitem analisar as superfícies antes e depois da trilha de desgaste, para os dois revestimentos.

Tabela 5. Imagens para comparação das superfícies desgastadas

	Antes da trilha	Depois da trilha
Revestimento A: Inconel 625		
Revestimento B: Nb		

Observa-se a indefinição do formato da trilha para o revestimento B e uma trilha bem definida no revestimento A. O Inconel 625 apresentou microdureza transversal de 180 Hv. Enquanto o nióbio aspergido apresenta valores de dureza próximos a 800 Hv,⁽⁷⁾ influenciado em parte pelo aumento de oxigênio. Na Figura 6 é possível avaliar a rugosidade em 2D dos dois revestimentos. Observa-se uma maior largura na trilha para o revestimento B em relação ao A, porém se pegarmos o maior valor de pico mostrado no gráfico anterior a trilha, teríamos um valor próximo de 12,5 µm, gerando uma área estimada de desgaste de bem superior à área de desgaste do

revestimento A. Os coeficientes de atrito foram calculados pelo perfilômetro e através do gráfico da Figura 7 o revestimento B apresentou coeficiente de atrito de 0,50, contra 0,46 do revestimento A. Os volumes de desgaste foram calculados em $35.898 \mu\text{m}^3$ para o revestimento A e de $103.038 \mu\text{m}^3$ para o B. A taxa de desgaste foi quantificada através da seguinte relação:

$$Ws (\text{m}^3/\text{N.m}) = \frac{\delta V}{x.F} \quad (1) \quad , \text{ onde}$$

δV : volume de desgaste;
 x: distância de deslizamento;
 F: carga normal em N.

Para o revestimento A, a taxa de desgaste calculada foi de $2,49 \times 10^{-15} \text{ m}^3/\text{N.m}$ para o revestimento A enquanto que para o revestimento B a taxa foi de $23,42 \times 10^{-15} \text{ m}^3/\text{N.m}$. O valor maior de taxa de desgaste do nióbio pode ser atribuído em parte a menor área de contato de desgaste no ensaio realizado, em função da maior rugosidade obtida para o revestimento, gerando um valor não esperado em razão da maior dureza do mesmo.

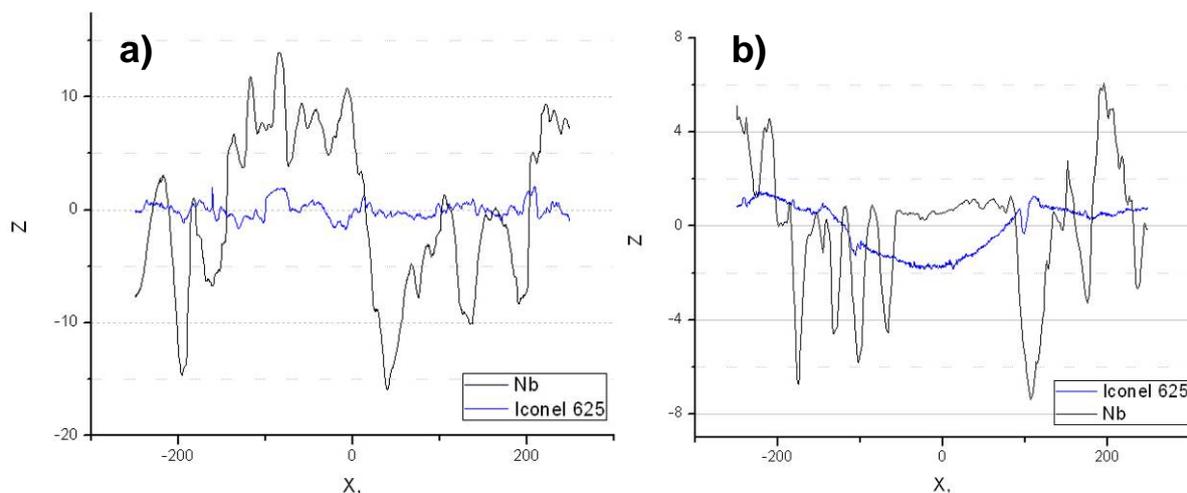


Figura 5. Gráficos obtidos por perfilometria, Z indica a profundidade a) Rugosidade antes da trilha, b) Rugosidade depois da trilha.

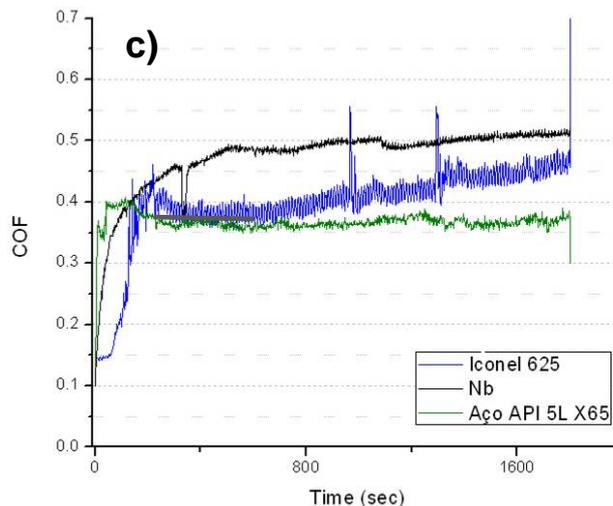


Figura 6. Gráfico de coeficiente de atrito obtido através do tribômetro.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho mostraram que o desgaste maior aconteceu no revestimento de nióbio, apesar de possuir maior dureza em relação ao revestimento de Inconel 625. De acordo com a rugosidade e a morfologia apresentada pelo revestimento aspergido de nióbio, tipicamente irregular, o resultado maior em volume e em taxa de desgaste não foi conclusivo para caracterizar este revestimento como menos resistente em relação ao de Inconel 625. Seria mais conclusivo se as duas superfícies possuíssem uma rugosidade mais semelhante, de modo a aproximar a área de contato ao longo do desenvolvimento da trilha.

Agradecimentos

Ao LAPEC pela estrutura disponível e ao CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 SOUZA, A. P. F. et al., 2000, "Colapso de dutos flexíveis sob pressão externa", Bol. téc. Petrobras, Rio de Janeiro.
- 2 CARVALHO, L.J. de. Estudo do comportamento de revestimentos à base de Nióbio aplicados por Aspersão Térmica a Chama, na corrosão de aços ao carbono em presença de ácidos naftênicos e sulfetos em altas temperaturas. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004
- 3 INOUE, Henry. Niobium in high temperature applications. Metals and Ceramics Division Oak Ridge National Laboratory, Tennessee. USA
- 4 TOMANIK E.; ZABEU C.; ALMEIDA G.; Abnormal wear on piston top groove, Mahle Metal Leve S.A., Paper SAE 2003-01-1102, 2003.
- 5 KEJELIN, Norton. Dissimilar Metal Welding of X-60 Steel with Inconel 625. Labsolda/EMC/UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.
- 6 VDM, ThyssenKrupp. Corrosion-resistant and high-temperature alloy. Nicrofer 6020 hMo – alloy 625 Material Data Sheet No. 4018, June 2002 Edition
- 7 GRAF, Karin. Revestimentos Nb/Al para altas temperaturas. 4o PDPEURO, Campinas, SP 21-24 de Outubro de 2007