

# DESGASTE POR ABRASIÓN DEL ACERO API 5L X65 REVESTIDO CON NIOBIO POR ASPERSIÓN TÉRMICA A PLASMA Y CON INCONEL 625 POR SOLDADURA

## ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF API 5L X65 STEEL COATED WITH NIOBIUM PLASMA THERMAL SPRAY AND BY INCONEL 625 WELDING

JOSE MATOS

*MSc., Escuela de Ingeniería, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, fidel.matos@ufrgs.br*

FELIPE MOTTA

*MSc., Escuela de Ingeniería, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, felipe\_p\_motta@hotmail.com*

LEONARDO ANTONINI

*MSc., Escuela de Ingeniería, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, leomantonini@gmail.com*

EDUARDO SCHNEIDER

*Ph.D., Instituto de Ciencias Exactas y Tecnológicas, Universidade Feevale, eduardoluis@feevale.br*

ROBERTO SCHROEDER

*Ph.D., Escuela de Ingeniería, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, schroede@ufrgs.br*

CÉLIA MALFATTI

*Ph.D., Escuela de Ingeniería, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, celia.malfatti@ufrgs.br*

Recibido para revisar Marzo 14 de 2012, aceptado Mayo 29 de 2012, versión final Junio 13 de 2012

**RESUMEN:** El objetivo de este trabajo fue evaluar y caracterizar el comportamiento mecánico en desgaste del acero API 5L X65, revestido con niobio en comparación al desempeño del revestimiento de la aleación de inconel 625 empleados en la industria de petróleo y gas. El revestimiento de niobio fue obtenido por el proceso de aspersión térmica a plasma de arco no transferido y el revestimiento inconel 625 por soldadura con electrodo revestido. La resistencia al desgaste por abrasión fue evaluada según la norma Petrobras N-2568, en un tribómetro CTER, la rugosidad y el volumen de material desgastado se determinó a través de perfilometría y la dureza de los revestimientos por microscopía Vickers. Los revestimientos obtenidos fueron caracterizados respecto a su morfología por microscopía electrónica de barrido (MEB) y microscopía óptica (MO). La mayor dureza del revestimiento con niobio obtenido puede haber contribuido a reducir la tasa de desgaste en comparación con el revestimiento de inconel 625.

**PALABRAS CLAVE:** Desgaste, revestimiento de inconel 625, revestimiento de niobio

**ABSTRACT:** The aim of this study was to evaluate the abrasive wear resistance of the API 5L X65 steel coated with niobium and Inconel 625 alloy. The niobium coating was obtained by thermal spray process with non-transferred arc plasma and the inconel 625 coating was obtained by shielded metal arc welding. The abrasion resistance was evaluated according to standard Petrobras N-2568, in a tribometer CETR and the coating roughness was determined using profilometry. The coating hardness was determined by Vickers microhardness. The coating morphologies were also characterized by scanning electron microscopy and optical microscopy. The high hardness of niobium coatings contributed to reducing the rate wear compared to the inconel 625 coating.

**KEYWORDS:** Wear, Inconel 625 coating, niobium coating

### 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los mayores desafíos en la explotación de petróleo en aguas profundas es la obtención de sistemas de transporte de la producción entre el pozo

y la plataforma, capaces de soportar el movimiento de las corrientes marinas y los esfuerzos de tracción y compresión que se generan [1].

La selección de revestimientos para la aplicación en estas condiciones, tales como los aplicados en tubos

ascendentes flexibles y diversos componentes de estos sistemas de producción debe atender también a los requisitos de resistencia a la corrosión y al desgaste abrasivo por el contacto entre los diversos equipos presentes a lo largo de la tubería. En este sentido, la aplicación de revestimientos de niobio viene surgiendo como alternativa para aplicaciones que requieran materiales resistentes a estas condiciones críticas de operación y que, además de eso, posean y mantengan buenas propiedades mecánicas de trabajo [2].

Con la aplicación del revestimiento de niobio se pretende obtener una película adherente y resistente a la corrosión. Los depósitos de niobio presentan una relativa buena ductilidad, resistencia a la corrosión, resistencia a la degradación a altas temperatura y elevada dureza cuando

son obtenidos por aspersión térmica [3]. Además de eso, el niobio presenta buena resistencia al desgaste por abrasión [4]. El presente trabajo tiene por objetivo el estudio de la resistencia al desgaste por abrasión de revestimientos de niobio obtenidos por aspersión térmica a plasma y de revestimientos de Inconel 625, obtenidos por soldadura con electrodo revestido.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los revestimientos fueron depositados sobre muestras rectangulares 120x20x11,5 mm, mecanizadas en el sentido longitudinal de un tubo de acero sin costura API 5L X65. La composición de este acero (API 5L X65) y los revestimientos empleados (NiCrMo-3 y Nb) se citan en la tabla 1.

**Tabla 1.** Composición química del metal y de los revestimientos empleados

Elemento	API X65	NiCrMo-3	Nb (polvo)	Elemento	API X65	NiCrMo-3	Nb (polvo)
C	0,120	0,040	0,008	Co	-	-	-
Si	0,240	0,500	-	Cu	-	-	-
Mn	1,360	0,600	-	Nb	0,040	3,300	98,900
P	0,008	-	-	Ti	0,001	-	0,002
S	0,003	-	0,002	V	0,050	-	-
Cr	0,020	22,000	-	Fe	98,100	3,000	-
Mo	0,040	9,000	-	O	-	-	0,240
Ni	0,010	61,500	-	H	-	-	0,002
Al	0,050	-	-	N	-	-	2,600

El revestimiento de niobio fue obtenido por aspersión térmica a plasma a partir del polvo de metal de niobio, con una granulometría media de 23  $\mu\text{m}$ . El polvo fue previamente secado en una estufa a una temperatura de 80  $^{\circ}\text{C}$ , por 30 minutos. Para la preparación de la superficie del sustrato de las muestras mecanizadas se procedió con la limpieza superficial de grado Sa2 [5, 6], este grado corresponde a la limpieza con abrasivo de alúmina comercial y sirve para remover los óxidos que se generan durante la laminación, forja y otros materiales extraños, luego la superficie es limpiada con aire seco comprimido o con cepillo limpio, hasta conseguir una superficie de coloración gris, luego es pre-calentado con un soplete hasta alcanzar una temperatura deseada de 120  $^{\circ}\text{C}$  (monitoreada con un pirómetro).

La aspersión térmica fue realizada por un equipo de plasma spray Sulzer Metco. Los parámetros del proceso son, 500 A de corriente eléctrica, distancia entre el sustrato y el soplete de 10 cm, flujo de polvo de 15,0 g/min y flujo de

gas argón de 2,0 L/min. Se utilizó una pequeña cantidad de hidrógeno en el gas ionización como complemento para la energía de ionización del sistema.

Para el revestimiento de Inconel 625, se emplea el proceso de soldadura con electrodo revestido, usando el electrodo tipo básico de bajo hidrógeno NiCrMo-3 de diámetro 3,25 mm. La corriente de soldadura que se utiliza es de 80 A, con polaridad positiva en el electrodo y velocidad aproximada de 10 cm/min.

Luego de obtener los revestimientos, las muestras se someten a un ensayo de desgaste abrasivo en un tribómetro (CETR PRO500 3D. Profílometro) (figura 1) por la fricción que se genera en el contacto de la esfera de alúmina con la superficie de los revestimientos. Los parámetros de ensayo de desgaste fueron fijados conforme a norma Petrobras N-2568, publicado en el año 2004 [7].

Se busca analizar el desgaste por la comparación del volumen de la huella que se obtiene en cada superficie luego del ensayo de desgaste, se utilizó para ello un perfilómetro de contacto generando imágenes en 3D. Se evaluó también el coeficiente de fricción y la dureza de los revestimientos durante 15 segundos, con una carga de 200 g. La magnitud de la carga es porque los espesores de los revestimientos (inconel y niobio) son mayores de 100  $\mu\text{m}$ , que garantiza que no ultrapasará la capa de revestimiento y llegar al sustrato.

Estos revestimientos también fueron evaluados por microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido.

Las micrografías mostradas en la figura 2, muestran las partículas de niobio depositadas por aspersion térmica a plasma, la superficie presenta rugosidades típicas debido a la formación de las capas depositadas una sobre otras fundidas o semi-fundidas.

El revestimiento obtenido presentó un espesor de 100  $\mu\text{m}$ , con una desviación estándar de 0,09. Fue posible observar también, la presencia de regiones porosas y fisuras que se muestran en la figura 2. La figura 2a, muestra el revestimiento de niobio, con una topografía y granulometría irregular, la figura 2b, muestra el revestimiento de niobio sobre el metal base (ferrita y perlita)

**Tabla 2.** Parámetros del ensayo de desgaste

Carga (N)	Frecuencia (Hz)	Curso (mm)	Tiempo de ensayo (h)
2	2	2	0.5



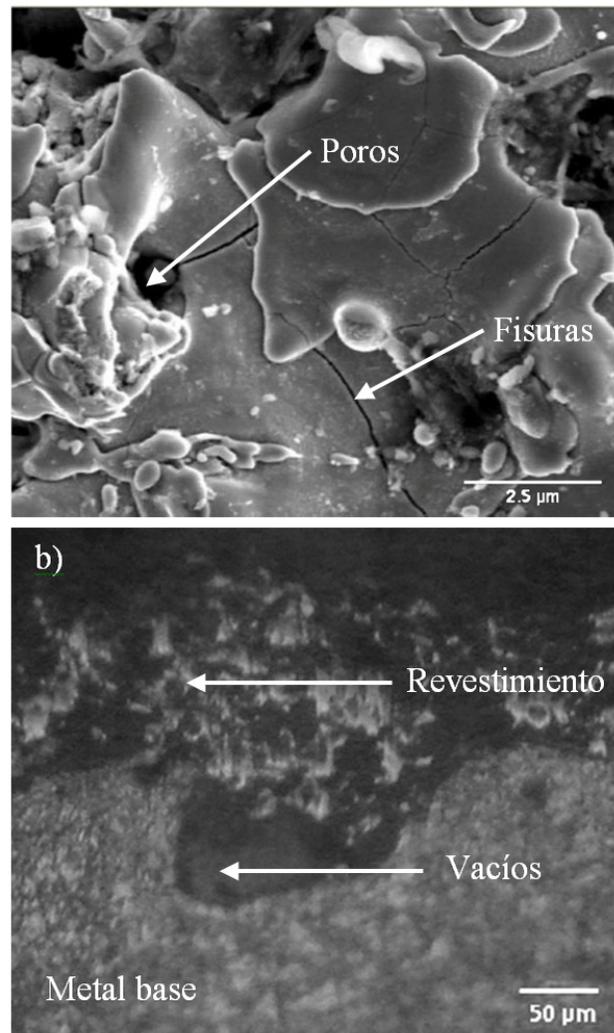
**Figura 1.** Tribómetro usado en los ensayos de desgaste

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

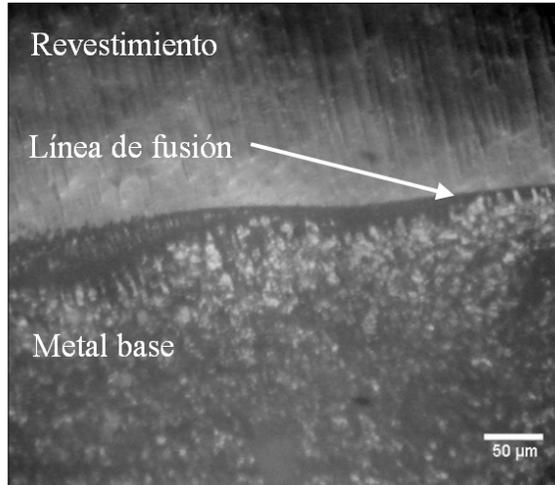
Los resultados muestran (tabla 3) una rugosidad elevada para el revestimiento de niobio en comparación al inconel, principalmente en relación al valor de  $R_y$ , caracterizando una superficie bastante irregular.

**Tabla 3.** Valores de rugosidad de los revestimientos antes de realizar el ensayo de desgaste.

Muestras	Rugosidad	
	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Ry ( $\mu\text{m}$ )
Revestimiento de inconel 625	0,71	11,00
Revestimiento de niobio	5,63	64,00
Acero áspero API 5L X65	5,72	41,53



**Figura 2.** Micrografías del revestimiento de niobio, a) MEB, parte superior y b) Microscopía óptica transversal, ataque Nital 2 %



**Figura 3.** Micrografía transversal obtenida por microscopía óptica del Inconel 625, ataque nital 2%

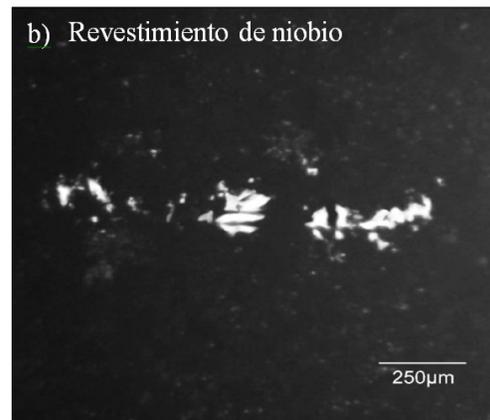
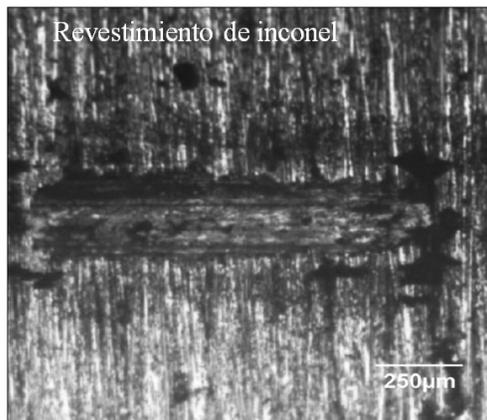
El revestimiento de inconel depositado por soldadura con electrodo revestido se caracteriza por la fusión total del metal de soldadura, generando una superficie uniforme [8]. Este proceso es típicamente empleado en

la reparación de la unión de tuberías [9], principalmente en los pases de relleno. Mientras que el acabado del revestimiento depende de la habilidad del soldador, siendo los procesos semiautomáticos los más usados y los procesos más productivos MIG.

Es posible observar en la figura 3, la micrografía transversal del acero API 5L X65 revestido con inconel 625. El revestimiento debe ser totalmente austenítico hasta altos niveles de dilución pudiendo, por tanto, formar zonas parcialmente diluidas próximas a la línea de fusión entre el metal base y el metal fundido [10].

Estas zonas se asemejan, por lo que son analizadas mediante el diagrama de Schaeffler [11], de la región martensítica, donde la dureza es elevada, lo que puede comprometer la integridad de la unión soldada de estos materiales, que son diferentes.

En lo que se refiere a este trabajo, no es objetivo evaluar las alteraciones micro-estructurales que ocurren. Las huellas de desgaste pueden ser observados en la figura 4.



**Figura 4.** Imágenes de los desgastes, a) Revestimiento de inconel 625, b) Revestimiento de niobio

Se observa (figura 4-b) que el desgaste obtenido para el revestimiento de niobio, es irregular, mientras que el obtenido para el revestimiento con inconel presenta una forma bien definida (figura 4-a). Esto está asociado al hecho de que el revestimiento de niobio presenta una elevada rugosidad en comparación al revestimiento de inconel. El Inconel 625 presenta un alto valor de límite de resistencia a la tracción pero al mismo tiempo el límite de fluencia no es considerado alto, siendo en torno de 450 MPa [12], presentando un gran endurecimiento y alargamiento en el ensayo de

tracción. El niobio es un metal dúctil, pero presenta valores elevados de dureza cuando se deposita mediante atomización (spray) aplicando procesos térmicos. La elevada rugosidad del revestimiento de niobio puede haber contribuido a generar un área menor de contacto entre la superficie de revestimiento y la esfera de alúmina, minimizando, de esa forma, el desgaste del revestimiento. Las imágenes de las figura 5 y 6 muestran las superficies antes y después del ensayo de desgaste, para los dos revestimientos.

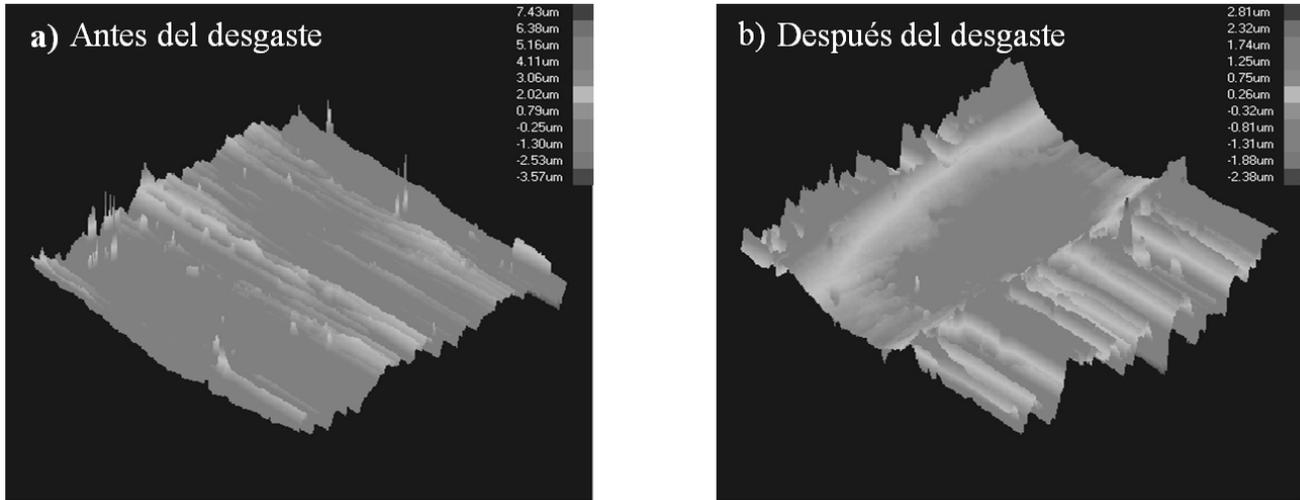


Figura 5. Imágenes obtenidas en el perfilómetro del revestimiento con Inconel 625

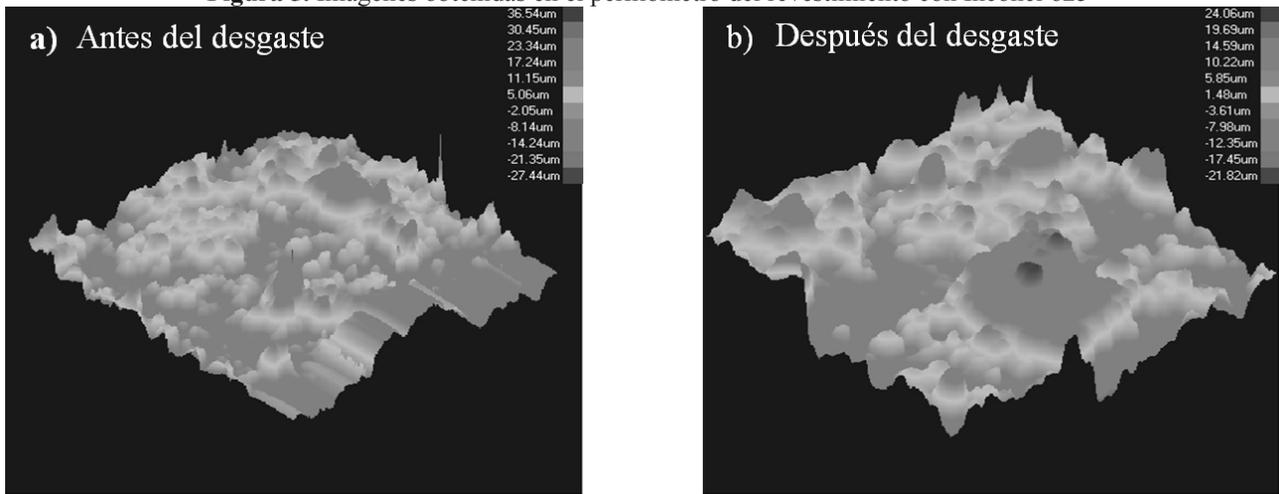


Figura 6. Imágenes obtenidas en el perfilómetro del revestimiento con niobio

Se observa una huella de desgaste de forma indefinida para el revestimiento niobio (figura 6) y una huella de desgaste bien definido para el revestimiento inconel (figura 5). El inconel 625, presenta una micro-dureza transversal de 180 Hv. Mientras que respecta al niobio esparcido presenta valores de dureza próximo a 670 Hv [13], influenciado, en parte, por el aumento de oxígeno.

Los coeficientes de fricción ( $\mu$ ), fueron determinados a partir del ensayo de desgaste (figura 7), donde se puede observar que el revestimiento de niobio presenta un coeficiente de fricción de 0,5 en comparación con 0,46 del revestimiento de inconel.

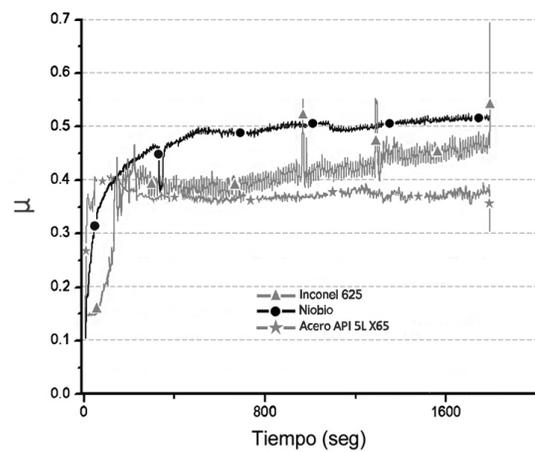


Figura 7. Gráfico de coeficientes de fricción obtenidos a través del tribómetro

Los volúmenes de desgaste fueron calculados en  $3,6 \times 10^4 \mu\text{m}^3$  para el revestimiento de niobio y  $10,3 \times 10^4 \mu\text{m}^3$  para el revestimiento inconel.

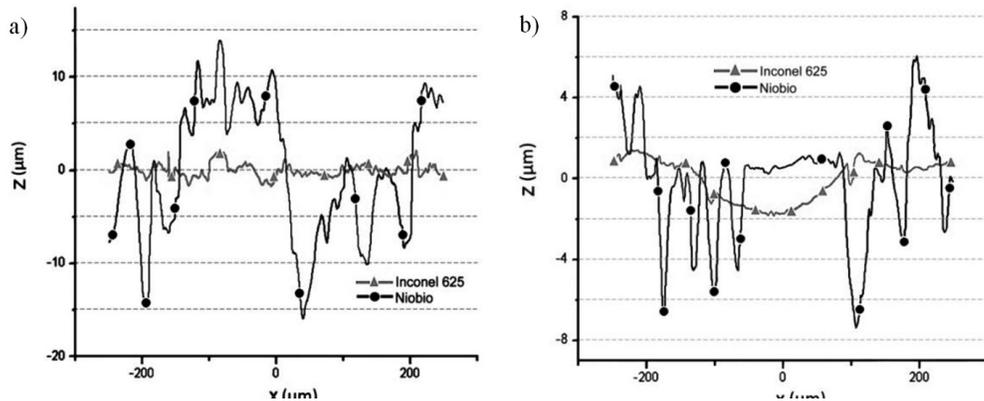
$$W_s = \frac{\delta V}{x \cdot F} \left( \text{m}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \right) \quad (1)$$

$\delta V$ : Volumen de desgaste

$x$ : Distancia de deslizamiento

$F$ : Carga normal en N

La tasa de desgaste calculada (ecuación 1) para el revestimiento de niobio es de  $5,0 \times 10^{-15} \text{m}^3/\text{N} \cdot \text{m}$  y para el revestimiento de inconel fue de  $14,3 \times 10^{-15} \text{m}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ . La mayor tasa de desgaste del inconel puede ser atribuida (en parte) a una área menor de contacto de desgaste en el ensayo realizado, en función de la mayor rugosidad obtenida para este revestimiento (figura 8).



**Figura 8.** Gráficos obtenidos por perfilometría, Z indica la profundidad a) Rugosidad antes del desgaste b) Rugosidad después del desgaste

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que el revestimiento de niobio presenta un menor desgaste por abrasión, en comparación al revestimiento de inconel 625. El revestimiento de niobio presenta una mayor rugosidad, el elevado valor de la dureza puede haber contribuido a reducir la tasa de desgaste del mismo.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la CAPES, CNPq y al LAPEC (UFRGS)

#### REFERENCIAS

- [1] Souza, A.P.F., Colapso de dutos flexíveis sob pressão externa, Boletín técnico, Petrobras, Rio de Janeiro, Brasil, 2000.
- [2] Carvalho, L.J., Estudo do comportamento de revestimentos a base de niobio aplicados por aspersão térmica a chama, na corrosão de aços ao carbono em presença de ácidos naftênicos e sulfetos em altas temperaturas, Tesis de

doctorado, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.

- [3] Marulanda, J., García, A. y Vitola, J., Protección contra la corrosión por sales fundidas de un acero al carbono por rociado térmico, Dyna, Año 76, Nro 157, pp. 251-256, 2009.
- [4] Tomanik, E., Zabeu, C. y Almeida, G., Abnormal wear on piston top groove, Mahle metal leve s.a., Paper SAE 2003-01-1102, 2003.
- [5] NORMA PETROBRAS: N-9. Tratamentos de Superfície de Aço com ato Abrasivo e Hidrojateamento. <http://dc102.4shared.com/doc/JnnqVZ7T/preview.html>
- [6] Momber, A., Blast cleaning technology, Hamburg, Germany, pp. 338-347, 2008.
- [7] NORMA PETROBRAS: N-2568. Revestimentos Metálicos por Aspersão Térmica. <http://dc245.4shared.com/doc/dcYKqXag/preview.html>.
- [8] Edris, H., McCartney, D.G., Y Sturgeon, A.J., Microstructural characterization of high velocity oxy-fuel sprayed coating of inconel 625, 863-872, Journal of Materials Science, 37 (4), UK, 1997.

[9] Marlow, F., Welding fabrication and repair, questions and answers, pp. 35-100, NY, USA, 2002.

[10] Kejelin, N. Y Almeida. A., Dissimilar metal welding of X-60 steel with inconel 625, Labsolda/EMC/UFSC, Florianopolis, Brasil, 2008. [http://www.labsolda.ufsc.br/noticias/2007/soldagem\\_dissimilar.pdf](http://www.labsolda.ufsc.br/noticias/2007/soldagem_dissimilar.pdf)

[11] Kou, S., Welding Metallurgy, Second edition, p. 461, USA, 2002.

[12] THYSSENKRUPP. Corrosion-resistant and high temperature alloy, Nicrofer 6020 hMo–alloy 625 (en línea) (2007) [http://www.thyssenkrupp.ch/documents/2\\_4856\\_e.pdf](http://www.thyssenkrupp.ch/documents/2_4856_e.pdf)

[13] Graf, K. Y Clímaco. A.S., Revestimentos Nb/Al para altas temperaturas, 4º PDPETRO, Campinas, São Paulo, Brasil, 2007.