

## **Influencia de la composición física de la capa de barniz impermeabilizante de electrodos rútilicos sobre la porosidad en la soldadura subacuática mojada**

## **The influence of the mineralogical composition of waterproof varnish layer of rutile electrodes on porosity in underwater wet welding**

*Alexandre Queiroz<sup>1\*</sup>, Ezequiel Caires Pereira<sup>1</sup>, Lorenzo Perdomo<sup>2</sup>; Rafael Quintana<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Universidad Federal de Minas Gerais, Departamento de Ingeniería Mecánica, Laboratorio de Robótica, Soldadura y Simulación. Av. Antônio Carlos, N.º 6627, Pampulha, 31270-901 Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil

<sup>2</sup> Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV) Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS). Carretera a Camajuaní km 5½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba, CP 54 830

(Recibido el 22 de febrero de 2009. Aceptado el 24 de agosto de 2009)

### **Resumen**

Los electrodos rútilicos impermeabilizados se usan frecuentemente en la soldadura subacuática por su buen comportamiento tecnológico. Una alternativa para mejorar su comportamiento sería incorporar compuestos químicos a la capa de barniz. En el presente trabajo se presentan los resultados obtenidos con la adición de una mezcla pirometalúrgica exotérmica en la primera capa de barniz de electrodos rútilicos del tipo 6013 y 7024. La mezcla pirometalúrgica propuesta proporciona, por etapas, oxígeno al medio, según la temperatura del revestimiento, alterando así la presión parcial del hidrógeno del medio circundante. El elemento químico portador de oxígeno en la mezcla pirometalúrgica se reduce hasta su estado elemental, interactuando después con el baño de soldadura como desoxidante. Todo este proceso brinda un balance energético favorable al proceso de soldadura. A 50 metros de profundidad se comparan el comportamiento tecnológico, la cantidad de poros en el metal de soldadura, la estructura metalográfica y la composición química de los depósitos metálicos realizados con electrodos barnizados de la manera tradicional y con los barnizados con la mezcla pirometalúrgica.

---

\* Autor de correspondencia: teléfono: +31 + 3 + 409 52 45, fax: +31 + 3 + 443 37 83, +31 + 3 + 409 35 26, correo electrónico: bracarense@ufmg.br (A. Queiroz).

Con los electrodos del tipo 6013 cubiertos con barniz modificado se logró disminuir los niveles de porosidad en los cordones en un 16% y con los electrodos 7024 en un 59%.

----- *Palabras clave:* soldadura subacuática mojada, electrodos rutilicos, capa de barniz

### Abstract

Waterproof varnish coated rutile electrodes are used frequently in the underwater wet welding because of their good technological behavior. An alternative to improve its behavior would be to incorporate chemical compounds to the waterproof varnish layer. In the present work the results obtained with the addition of an exothermic pyrometallurgical mixture in the first waterproof varnish layer of rutile electrode types 6013 and 7024 are presented. Depending on the temperature of coating, the proposed pyrometallurgical mixture provides oxygen by stages altering the partial pressure of hydrogen of surrounding means. The carrying chemical oxygen element in the pyrometallurgical mixture is reduced until its elementary state, interacting later with the metal in weld pool as deoxidizer. All this process offers a favorable energetic balance to the welding process. Welds were performed at 50 meters deep with electrodes having traditional varnish and varnish with additions. The technological behavior, amount of porous, metallographic structure and chemical composition were measured. For the E6013 electrodes the porosity was reduced to 16% while for the E7024 by 59%.

----- *Keywords:* Underwater wet welding, welding rutile electrodes, varnish layer

### Introducción

La soldadura subacuática mojada brinda ventajas, sobre todo en operaciones de reparación, debido a que se logra una reducción apreciable de los costos. Este hecho ha motivado la realización de un alto número de investigaciones encaminadas a mejorar la calidad de las reparaciones tanto a través de las tecnologías empleadas para realizar las soldaduras como las relacionadas con la calidad de los materiales a utilizar. Entre los problemas más frecuentes que aparecen en la soldadura subacuática mojada, según la profundidad, se encuentran los relacionados con la estabilidad del arco y con la presencia de poros y grietas, que influyen significativamente en la calidad de los depósitos obtenidos [1, 2, 3]. Para realizar las operaciones de soldadura, normalmente, los elec-

trodos son impermeabilizados a través de una o varias capas de barniz, las que evitan la humectación del revestimiento protegiendo además la integridad del mismo. En las operaciones de soldadura y reparación en condiciones subacuáticas se han empleado diferentes tipos de electrodos, pero dentro de ellos, los más ampliamente usados son los electrodos rutilicos, debido fundamentalmente, a que ofrecen mejor estabilidad del arco [3, 4, 5].

Los electrodos macizos de tipo rutilicos están formados por un núcleo metálico de acero al carbono y un revestimiento integrado por una amplia variedad de componentes, donde predomina el rutilo y determinadas cantidades de aluminosilicatos, carbonatos y componentes volátiles, parte de ellos se descomponen y se eliminan durante el proceso

de soldadura [6]. Entre las ferroaleaciones más usadas, es frecuente emplear el FeMn y el FeSi como desoxidantes [7]. Estos componentes son los encargados del comportamiento tecnológico y metalúrgico del electrodo y de garantizar las propiedades mecánicas en los depósitos, las que se ven seriamente afectadas bajo las condiciones de la soldadura subacuática mojada, debido a los altos niveles de poros y grietas que se producen. Este hecho ha sido estudiado por varios autores, que atribuyen éste comportamiento a los altos contenidos de oxígeno e hidrógeno presentes durante la realización del proceso de soldadura [8]. Para minimizar estos efectos se ha evaluado la incorporación de diferentes sustancias a los revestimientos de los electrodos lográndose en muchos casos disminuir los efectos negativos, pero este aspecto obliga a diseñar electrodos de uso exclusivo para las operaciones de soldadura en condiciones subacuáticas [9].

Una alternativa que puede ser empleada y que permite usar un electrodo de uso común del tipo rutilico (6013 y 7024) para las operaciones de soldadura y recuperación en condiciones subacuática mojada es la de incorporar aditivos adecuados a través de la capa de barniz que contrarresten en cierta medida los efectos del medio subacuático. Esto permite contar con un nuevo espacio reactivo para la adición de otros componentes al consumible sin afectar las condiciones originales de fabricación, además evita la interacción directa entre el elemento adicionado y los componentes del revestimiento, haciendo más efectiva su acción sobre el baño metálico [10]. A partir de este criterio el presente trabajo tiene como objetivo fundamental evaluar la influencia que tiene la adición de componentes activos a la capa de barniz, de electrodos rutilicos de los tipos 6013 y 7024, sobre los niveles de porosidad en los depósitos obtenidos a 50 metros de profundidad.

## Materiales y métodos

Durante el desarrollo de los experimentos se emplearon electrodos rutilicos comerciales del

tipo 6013 de 4,00 mm y 7024 de 5,00 mm. Estos electrodos primeramente se estufaron a  $80 \pm 10$  °C durante  $1,5 \pm 0,5$  horas [11], después barnizados y finalmente fueron secados durante 24 horas a temperatura ambiente. Se seleccionó 1kg del electrodo 6013, que fue a la vez dividido en dos grupos: un primer grupo sólo fue impermeabilizados con dos capas empleando barniz tradicional vinílico 4800/10 (resina vinilica y solventes aromáticos) y un segundo grupo al cual se le introdujo en la primera capa de barniz una mezcla reactiva y exotérmica (pirometalúrgica).

Todo este procedimiento se repitió para el electrodo 7024. De esta manera se obtuvieron cuatro grupos de electrodos. Para formulación de la mezcla reactiva – exotérmica se utilizaron compuestos inorgánicos con una pureza sobre los 97% y una granulometría inferior a los 50  $\mu\text{m}$ .

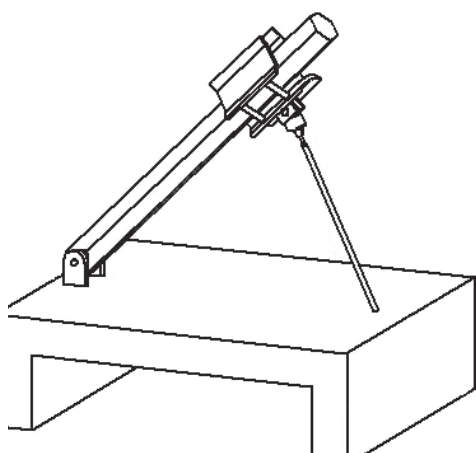
La soldadura subacuática mojada se realizó sobre planchas de acero del tipo API-5L grado B de 250 mm de largo, 100 mm de ancho y 17 mm de espesor, cuya composición química se muestra en la tabla 1.

**Tabla 1** Composición química del acero API-5L grado B

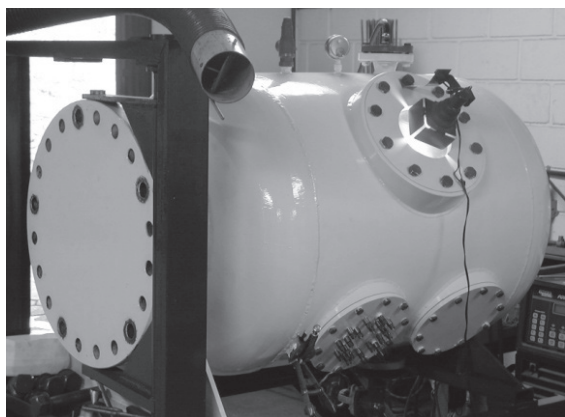
<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>
0,15	0,19	1,37	0,014	0,008	0,0	0,007
<b>Mo</b>	<b>V</b>	<b>Cu</b>	<b>Nb</b>	<b>Al</b>	<b>Ti</b>	
0,003	0,003	0,009	0,0	0,008	0,008	

La soldadura subacuática mojada se realizó empleando un dispositivo de soldadura por gravedad, en donde la varilla de soldar se encontraba situada a un ángulo de soldar de 55° con respecto a la vertical (figura 1).

Este dispositivo se coloca dentro de la cámara hiperbárica con una capacidad de 0,453 m<sup>3</sup>, que está conectada a un sistema hidráulico que brinda la posibilidad de alcanzar una presión hasta 20 atmósferas (simulación hasta 200 m de profundidad) (figura 2)



**Figura 1** Dispositivo para la soldadura accionada por gravedad



**Figura 2** Cámara hiperbárica para la simulación de profundidades hasta 300 m

La suspensión de la mezcla pirometalúrgica en el barniz vinílico se preparó lográndose una distribución homogénea (sólido-líquido) y comprobándose durante 72 horas que no hubo alteración alguna en las propiedades impermeabilizantes del barniz.

La densidad de la suspensión del barniz vinílico conteniendo la mezcla pirometalúrgica es de  $2,246 \text{ g/cm}^3$ , que al solidificarse se logra obtener en la primera capa,  $12\text{-}16 \text{ mg/cm}^2$  de la mezcla pirometalúrgica sobre la superficie del electrodo. Después de secada la película del barniz modificado se añade con el mismo procedimiento otra capa de barniz

tradicional. Es conveniente aclarar que el tamaño de las partículas de los constituyentes sólidos y la concentración de los mismos en la suspensión, así como la viscosidad de la suspensión resultante son factores importantes a considerar en la efectividad reactiva de la película aplicada.

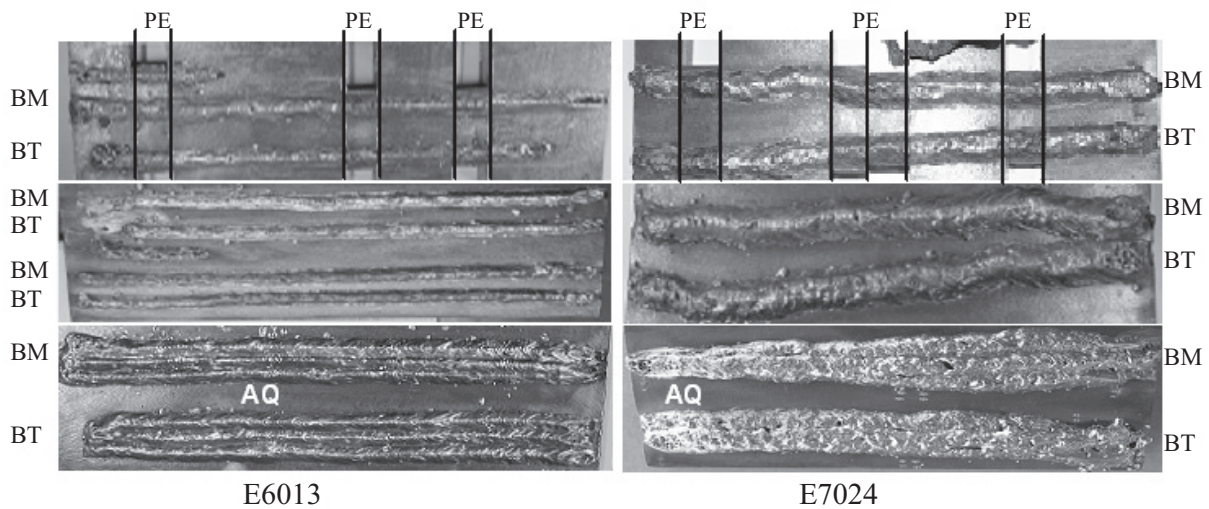
La operación de barnizado de los electrodos se realizó manualmente por inmersión para lo cual se siguen los siguientes pasos:

- Adicionar de manera uniforme la suspensión de barniz-reactivo al revestimiento a los electrodos.
- Secar la película barniz-reactivo durante 24 horas.
- Adicionar nuevamente el electrodo con el barniz sin reactivo.
- Secar la película multicapa de manera definitiva.

El espesor de la película de la primera capa con reactivos es ligeramente superior a los  $50 \mu\text{m}$

Los depósitos de soldadura fueron realizados con el dispositivo de soldadura por gravedad, empleando una corriente de 210 A para los depósitos realizados con electrodos 6013 y 290 A para los realizados con electrodos 7024, en todos los casos se utilizó polaridad inversa. La energía eléctrica fue suministrada por una fuente multipropósito de soldadura del tipo Power Wave 450 (versión one) y simulando en la cámara hiperbárica la profundidad de 50m.

Sobre cada una de las planchas de acero se realizaron cordones de soldadura, tanto con el electrodo impermeabilizado con el barniz normal como con el electrodo impermeabilizado con el barniz modificado, soldándose con el electrodo 6013 sobre dos planchas (P1 y P2), dos cordones sobre P1 y 4 cordones sobre P2, resultando un total de 6 cordones y soldándose con el electrodo 7024 sobre dos planchas (P1 y P2), dos cordones sobre cada plancha, lo que originó 4 cordones. En todos los casos se realizó primero el depósito con el barniz normal y al lado con el barniz modificado (ver figura 3).



**Figura 3** Depósitos realizados, a 50 metros de profundidad, con electrodos 6013 de 4 mm (E6013) y 7024 (E7024) de 5 mm, impermeabilizados con barniz tradicional y con la capa de barniz modificada (la dirección de la soldadura es de izquierda a derecha). **Leyenda:** PE- Probeta de Ensayo; BT-Barniz Tradicional; BM-Barniz Modificado, AQ- Depósitos para análisis químico

De cada una de las planchas, sobre las que se depositó el cordón con electrodo 6013, se extrajeron tres probetas del cordón realizado con el barniz normal y tres del realizado con el barniz modificado. Estas probetas se extrajeron del inicio (I), del centro (C) y del final (F) de cada cordón, cada una de las probetas fue preparada por ambas caras, lo que permitió evaluar las 6 caras correspondientes a cada cordón, para un total de 9 probetas para el electrodo 6013 barnizado de manera normal (18 caras) y 9 probetas para el electrodo 6013 con barniz modificado (18 caras).

De la primera plancha (P1), sobre la que se depositó el cordón con electrodo 7024 con el barniz normal, se extrajeron tres probetas y tres del realizado con el barniz modificado, de la misma manera que para el electrodo 6013. De la segunda plancha (P2) sobre la que se soldó con electrodo 7024 con barniz normal y modificado se extrajeron 4 probetas de cada cordón, pero en este caso una del inicio (I), dos del centro (C1 y C2) y una del final (F) para cada cordón. De manera similar, cada una de las probetas fue preparada por ambas caras, lo que permitió evaluar 7 probetas para el electrodo 7024 barnizado de forma normal y 7 para el electrodo 7024 con barniz modificado, lo

que equivale a un total de 6 caras de cada cordón de P1 y 8 caras de P2, para un total de 14 caras para el barniz normal y 14 para el modificado.

En la figura 3 se muestran las fotografías de todos los depósitos realizados con los electrodos 6013 y 7024, donde puede observarse la toma de las muestras de dos de las planchas soldadas.

Para determinar la porosidad, primero se determina el área de los poros, para lo cual se toman fotos de los depósitos y posteriormente se mide el área de todos los poros utilizando el Software Quantikov [12]. Mediante el mismo programa se mide el área de soldadura, determinándose la porosidad a partir de la relación entre el área de los poros y el área de soldadura, multiplicado por 100. Para la medición del área del cordón las muestras fueron atacadas con Nital al 2%.

Para realizar el análisis químico de los depósitos fue necesario realizar varios depósitos de soldadura sobre una plancha de acero del mismo tipo, posteriormente fueron extraídas las probetas de ensayo de diferentes partes del cordón (inicio, medio y final) y maquinadas de manera tal que permitieran la determinación de su composición mediante espectroscopia de emisión atómica. En la figura 3,

se pueden observar los depósitos realizados para el análisis químico, observándose que con cada electrodo se efectuaron 3 cordones de soldadura.

Para los análisis metalográficos se seleccionaron muestras del inicio, medio y final de cada uno de los cordones realizados, las cuales fueron preparadas y atacadas con Nital al 2%.

## Resultados y discusión

Normalmente, al revestimiento de los electrodos convencionales (macizos) son añadidos los elementos de aleación y de afino, que durante el proceso de soldadura son transferidos a los depósitos metálicos. Esta capacidad de recepción de estos componentes está limitada por el espesor del revestimiento y por el cumplimiento de las funciones tecnológicas y metalúrgicas para las cuales está diseñado.

Bracarense y colaboradores [10] observaron que modificando la composición de la capa de barniz era factible disminuir los niveles de porosidad de los depósitos obtenidos con electrodos del tipo 6013, mediante la incorporación de una mezcla reactiva exotérmica (pirometalúrgica) en la primera capa, lo cual no interfería con las funciones impermeabilizantes del barniz debido a que la adición de una segunda capa puede ser aplicada de la forma tradicional.

Un aspecto importante a destacar en la mezcla reactivo-barniz es que no se producen interacciones químicas entre los componentes. Existen componentes de naturaleza inorgánica que al ser añadidos a los revestimientos rutilicos para mejorar las características de las soldaduras subacuáticas mojadas, pueden interactuar con el silicato de sodio y/o potasio por sus características básicas, reduciendo así su actividad metalúrgica.

### **Comportamientos de los electrodos 6013 impermeabilizados**

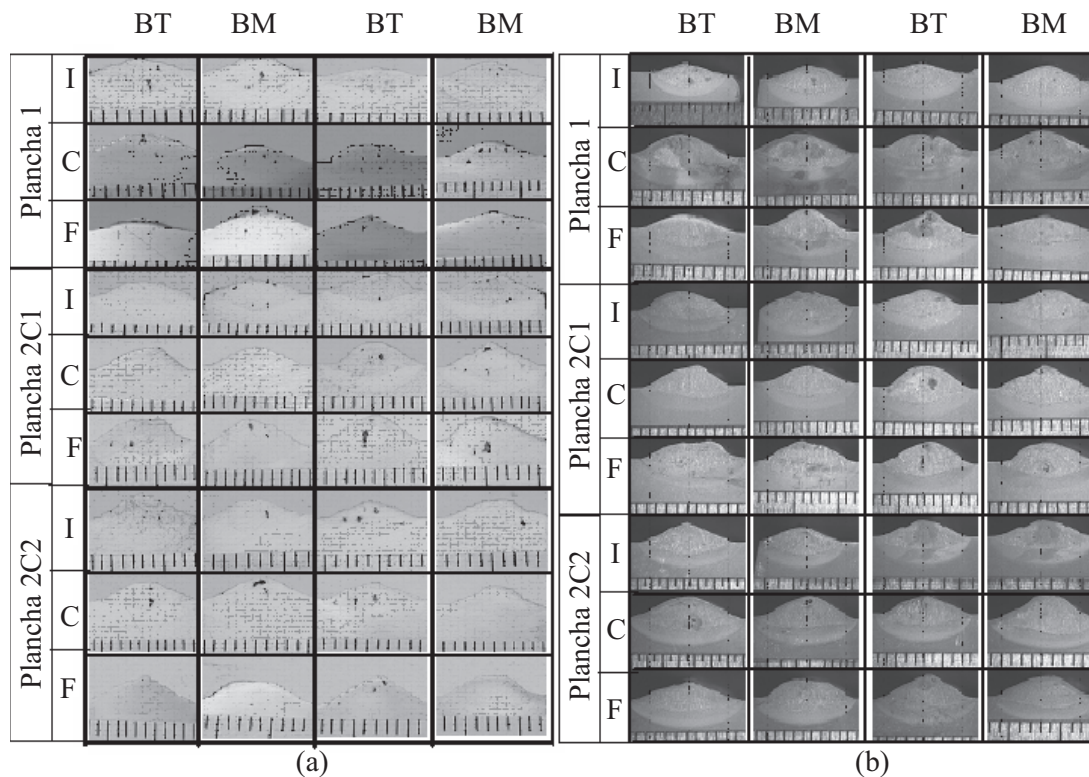
En la figura 3 puede apreciarse visualmente, que no se observaron grandes diferencias entre el depósito realizado con el electrodo 6013 impermeabilizado con barniz tradicional y el electrodo con barniz modificado, aunque puede destacarse que el electrodo

con barniz modificado se comporta de una manera más estable y el arco tiende a ser más suave, lo que hace que el cordón sea algo más uniforme.

Referente a la valoración visual de la porosidad (figura 4), en la figura 4a puede apreciarse, que existen muestras con mayores diferencias en los niveles de porosidad que en otras, observándose una tendencia general a obtener menor cantidad de poros en los depósitos realizados con el electrodo con barniz modificado que los obtenidos con barniz tradicional.

En la tabla 2 se observa, que a 50 m de profundidad los electrodos 6013 recubiertos con la capa de barniz modificado dan como promedio menores niveles de porosidad (0,885 %) en los cordones obtenidos con los realizados con electrodos recubiertos con barniz tradicional (1,062%) en las mismas condiciones. En general, los electrodos con barniz modificado presentan una disminución relativa en la porosidad del 20 % con respecto a los impermeabilizados con barniz tradicional. También se observa oscilaciones menores en la porosidad con los electrodos recubiertos con el barniz modificado que con aquellos con barniz tradicional.

En la tabla 3 se registra la composición química promedio de los depósitos realizados con electrodos del tipo 6013, donde se observa que no existe una gran variación en la composición química entre los depósitos realizados con los electrodos impermeabilizados con barniz tradicional y con los con barniz modificado, pero si se detecta claramente ligeras diferencias sobre todo en los elementos aleantes fundamentales. El contenido promedio de carbono disminuye en un 6%, para el depósito realizado con electrodos conteniendo barniz modificado, lo cual puede ser producido por el oxígeno suministrado por la mezcla durante la soldadura. El contenido promedio de manganeso y silicio aumentan en aproximadamente 4%, para el depósito realizado con el barniz modificado, a pesar del oxígeno suministrado por la mezcla, esto puede deberse a que la mezcla en una segunda etapa de reacción es capaz de suministrar manganeso, silicio y otros elementos metálicos al depósito (Al aumenta en ~14%, Cu aumenta en ~11%, Ti aumenta en ~17% y V aumenta en ~7%).



**Figura 4** Fotografía de las superficies de secciones transversales de los depósitos obtenidos con los electrodos 6013 a 50 metros para determinar la porosidad: (a) sin ataque químico superficial; (b) atacado con Nital a 2%, para la medición del área del cordón. **Leyenda:** BT-Barniz Tradicional; BM-Barniz Modificado; I, C y F- Probeta tomada del inicio, centro y final del cordón; C1 y C2- Cordón 1 y cordón 2 depositados sobre la plancha 2

**Tabla 2** Resultados promedios de la determinación de la porosidad de los depósitos realizados, a 50 metros de profundidad, con el electrodo 6013 impermeabilizados con barniz tradicional y con el barniz modificado

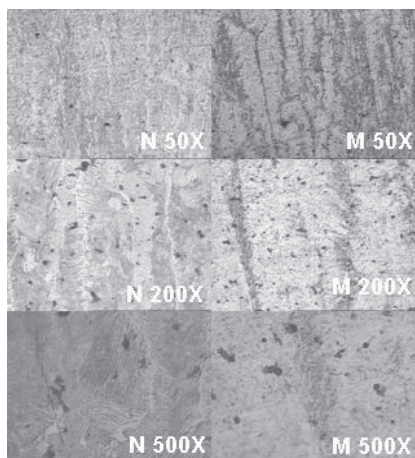
No de depósitos	Barniz tradicional			Barniz modificado		
	Área-cordón [mm]	Área-Poros	Porosidad %	Área-cordón	Área-poros	Porosidad %
1	23,132	0,250	1,081	22,476	0,202	0,899
2	22,850	0,221	0,967	26,199	0,249	0,950
3	23,364	0,266	1,139	22,810	0,184	0,807
$\bar{X}$	23,115	0,246	1,062	23,828	0,212	0,885
$\sigma$			0,0714			0,0592
Varianza			6,72			6,69

Disminución relativa del **20,04 %** de la porosidad con el barniz modificado respecto al barniz tradicional;  
 Promedio:  $\bar{X}$  ,  $\sigma$  = Variación estándar; Varianza:  $(\sigma / \bar{X})$

**Tabla 3** Resultados promedios de la determinación de la composición química para los depósitos realizados a 50 metros de profundidad con electrodos 6013 impermeabilizados con barniz tradicional (**N**) y con barniz modificado (**M**)

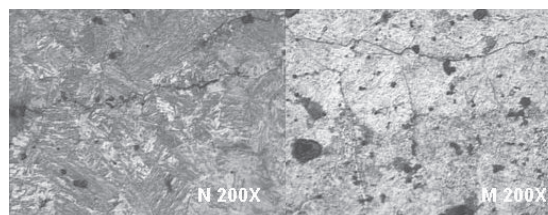
<i>Muestra</i>	<i>Elementos (%)</i>										
	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Mo</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Al</i>	<i>Cu</i>	<i>Ti</i>	<i>V</i>	
<b>N</b>	Inicio	0,130	0,25	0,42	0,020	0,016	0,010	0,010	0,040	0,026	0,013
	Medio	0,142	0,28	0,44	0,019	0,015	0,010	0,015	0,040	0,023	0,012
	Final	0,122	0,26	0,43	0,020	0,015	0,009	0,011	0,042	0,025	0,013
	<b>Prom.</b>	<b>0,131</b>	<b>0,26</b>	<b>0,43</b>	<b>0,020</b>	<b>0,015</b>	<b>0,010</b>	<b>0,012</b>	<b>0,041</b>	<b>0,025</b>	<b>0,013</b>
<b>M</b>	Inicio	0,132	0,26	0,44	0,020	0,015	0,009	0,013	0,041	0,025	0,013
	Medio	0,130	0,27	0,45	0,020	0,015	0,010	0,013	0,046	0,033	0,015
	Final	0,108	0,29	0,47	0,024	0,014	0,010	0,017	0,050	0,032	0,015
	<b>Prom.</b>	<b>0,123</b>	<b>0,27</b>	<b>0,45</b>	<b>0,021</b>	<b>0,015</b>	<b>0,010</b>	<b>0,014</b>	<b>0,046</b>	<b>0,030</b>	<b>0,014</b>

En la observación visual realizada a las muestras preparadas no se observaron diferencias apreciables entre las muestras del inicio medio y final del cordón, ni entre el depósito modificado y el normal. En la figura 5 puede observarse la estructura de uno de los depósitos realizados en condiciones de soldadura subacuática con electrodos impermeabilizados con barniz tradicional y modificado con la variante propuesta.



**Figura 5** Foto de la estructura metalográfica observada en los depósitos obtenidos con electrodos 6013 impermeabilizados con barniz tradicional (N) y con el barniz modificado (M)

En ambos cordones se observaron grietas en la zona térmicamente afectada, como se aprecia en la figura 6.



**Figura 6** Foto de las grietas observadas en la zona térmicamente afectada de los depósitos obtenidos con electrodos 6013 impermeabilizados con barniz tradicional (N) y con el barniz modificado (M)

**Comportamientos de los electrodos 7024 impermeabilizados**

En cuanto al comportamiento tecnológico de estos electrodos durante el proceso de soldadura (desde el punto de vista cualitativo), se puede señalar que se mantienen las mismas observaciones realizadas para los depósitos con electrodo 6013. De igual forma se extrajeron y prepararon las probetas de ensayo de diferentes partes del cordón. Los resultados de la determinación del área de los poros y de la porosidad se muestran en la

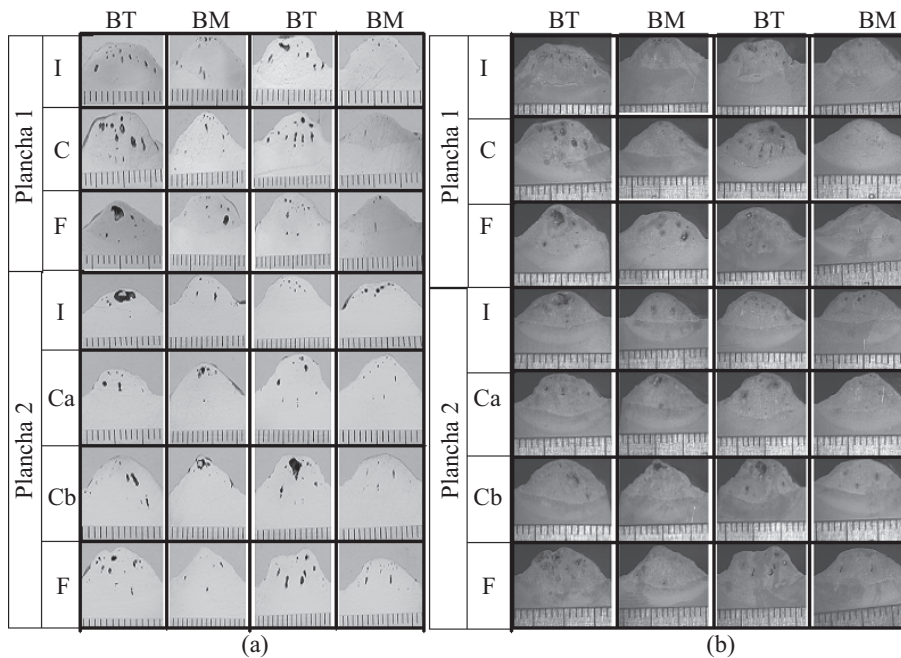


tabla 4 y las fotos de determinación del área de los poros se muestran en la figura 7a y las de la determinación del área del cordón aparecen en la figura 7b.

**Tabla 4** Resultados promedios de la determinación de la porosidad de los depósitos realizados, a 50 metros de profundidad, con el electrodo 7024 impermeabilizados con barniz tradicional y con el barniz modificado

No de Depósitos	Barniz tradicional (N)			Barniz modificado (M)		
	Área-Cordón [mm]	Área-Poros	Porosidad %	Área-Cordón	Área-Poros	Porosidad %
1	63,786	3,085	4,836	48,343	0,856	1,771
2	58,589	2,610	4,455	49,211	1,018	2,069
3	61,192	2,847	4,653	48,768	0,934	1,916
$\bar{X}$	61.188	2,848	4.648	48.777	0.937	1.919
$\sigma$			0,1556			0,1217
Varianza			3,34 %			6,34 %

Disminución relativa del 58,73 % de la porosidad con el barniz modificado respecto al barniz tradicional;  
 Promedio:  $\bar{X}$ ,  $\sigma$  = Variación estándar; Varianza:  $(\sigma / \bar{X})$ ;



**Figura 7** Fotografía de las superficies pulidas de los depósitos con electrodo 7024 a 50 metros para la determinación del área de los poros: (a) sin ataque químico; (b) atacado con Nital al 2%. Leyenda: BT-Barniz Tradicional; BM-Barniz Modificado; I, C y F- Inicio, centro y final de cada cordón; Ca y Cb- Probetas a y b tomadas del centro de la plancha 2

En la tabla 4, de igual manera que en la tabla 3, puede observarse una disminución promedio relativa del 58,81% en los niveles de porosidad de los depósitos al incorporar los aditivos a la primera capa de barniz, destacándose en este caso del electrodo 7024 la disminución promedio lograda (58,81%) es casi tres veces mayor que en el caso de los electrodos 6013 (20,04%). Es de destacar que el rango de la oscilación de la porosidad de los depósitos reali-

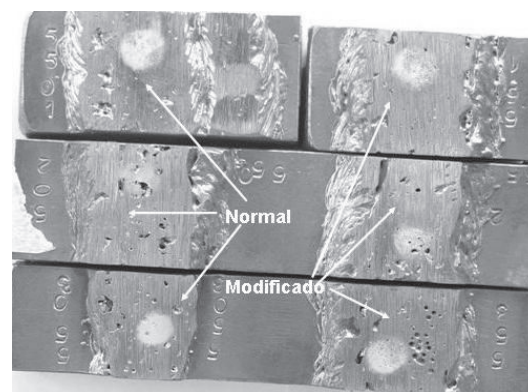
zados con electrodos 7024 barnizados tradicional es 1,3 veces mayor que el rango de oscilación obtenidos con los el barniz modificado. Es significativo, también, que en el caso de los electrodos 6013 las oscilaciones de la porosidad son del mismo orden (1,25), lo cual habla a favor del barniz modificado y que además significa una mejor reproducibilidad de constancia entre un 25 y 30 % a favor de los recubiertos con el barniz modificado.

**Tabla 5** Composición química de los depósitos obtenidos a 50 metros con barniz tradicional y con la primera capa modificada

Muestra	Elementos (%)										
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	Al	Cu	V
e702450mInicio	0,172	≥1,712	1,807	0,029	0,011	0,043	0,011	0,038	0,089	0,031	0,027
<b>N</b> e702450mMedio	0,178	≥1,712	1,890	0,051	0,026	0,068	0,023	0,085	≥0,146	0,097	0,067
e702450mFinal	0,594	≥1,712	≥2,052	0,070	0,036	0,116	0,035	≥0,136	≥0,146	0,179	0,156
e7024P50mInicio	0,081	0,575	0,809	0,025	0,023	0,024	0,011	0,015	0,027	0,015	0,09
<b>M</b> e7024P50mMedio	0,236	≥1,712	≥2,052	0,065	0,028	0,129	0,026	0,098	≥0,146	0,102	0,058
e7024P50mFinal	0,412	≥1,712	≥2,052	0,061	0,031	0,108	0,035	≥0,136	≥0,146	0,173	0,109

En la tabla 5 se pueden observar los datos de composición química de los depósitos obtenidos, apreciándose en la tabla una alta dispersión en los mismos y valores fuera de los rangos normales para estos depósitos, exceptuando la muestra tomada del inicio del depósito realizado con el electrodo 7024 con el barniz modificado, donde se obtuvieron valores que pueden ser asumidos como aceptables. Esta dispersión en los datos se debe a la presencia de poros, microporos, grietas y microgrietas en las superficies de los depósitos, lo cual provocan oscilaciones en los resultados de la caracterización química mediante espectroscopia de emisión atómica, no obstante los resultados nos indican la tendencia de la variación química a lo largo del cordón. En la figura 8 se puede observar una foto de los depósitos preparados, con el electrodo 7024, para el análisis químico, donde se observa la huella dejada y las presencia de poros sobre la superficie.

7024 barnizados de manera tradicional y con la capa de barniz modificada, donde de manera similar a la anterior no se aprecian grandes diferencias, ni a lo largo del cordón ni entre los depósitos efectuados de manera normal y con el barniz modificado.



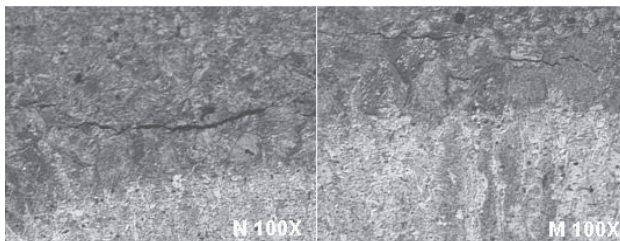
**Figura 8** Foto de las muestras seleccionadas, de los depósitos obtenidos con el electrodo 7024, para realizar el análisis químico

En la figura 9 se muestra la estructura metalográfica de los depósitos obtenidos con los electrodos



**Figura 9** Foto de la estructura metalográfica observada en los depósitos obtenidos con electrodos 7024 impermeabilizados con barniz tradicional (N) y con el barniz modificado (M)

En este caso también se observaron grietas en la zona térmicamente afectada en ambos depósitos. La figura 10 muestra una foto de las grietas en ambos cordones, en este caso se puede apreciar claramente que la grieta del depósito tradicional es mayor que la que se muestra para el depósito realizado con el barniz modificado.



**Figura 10** Foto de las grietas observadas en la zona térmicamente afectada de los depósitos obtenidos con electrodos 7024 barnizados de forma tradicional (N) y con el barniz modificado (M)

En toda la caracterización realizada tanto en los depósitos realizados con electrodos 6013 y con electrodos 7024 no se obtuvieron diferencias apreciables en la composición química y en la estructura de los depósitos realizados con el barniz tradicional y con el barniz modificado, solo se observaron diferencias apreciables en los niveles de porosidad, lo cual permite suponer que la mezcla pirómetalúrgica y exotérmica, está realizando

su mayor contribución sobre la atmósfera gaseosa que rodea la soldadura y no sobre el cordón en si lo cual debe estar originando una disminución apreciable en los niveles de hidrógeno y de oxígenos en el plasma, lo cual provoca una disminución en la porosidad del depósito. Por lo observado anteriormente esta contribución no llega a influir de manera apreciable en la estructura y la composición de los depósitos realizados.

## Conclusiones

1. La incorporación de una mezcla reactiva exotérmica (pirometalúrgica) en la primera capa de barniz permitió disminuir los niveles relativos de porosidad con los electrodos modificados en un 20 % para el electrodo 6013 y en un 58% para el electrodo 7024, lo cual constituye una alternativa atractiva para desarrollar investigaciones en este sentido.
2. La cantidad de poros obtenida con electrodos cubiertos con barniz modificado oscila menos entre un 25 y 30% menos que los barnizados tradicionalmente para los electrodos 6013 y 7024 respectivamente.
3. La incorporación de una mezcla reactiva exotérmica al barniz permite mejorar de manera significativa el desempeño de electrodos barnizados convencionalmente en la soldadura subacuática mojada a una profundidad de 50 metros, haciendo más factible su empleo.

## Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer el apoyo brindado por CNPq para la ejecución del proyecto de investigación lo cual ha permitido la obtención de los resultados presentados.

## Referencias

1. S. Ibarra, C. E. Grubbs, S. Liu. "State of the art and Practice of Underwater Wet Welding of Steel". S. Liu, D. L. Olson, C. Smith, J. S. Spencer (Eds). *International Workshop on Underwater Welding of Marine Structures*. New Orleans, Louisiana, USA. 1994. pp. 70-134.

2. S. Liu, A. Pope, R. Daemen. "Welding Consumables and Weldability". S. Liu, D. L. Olson, C. Smith, J. S. Spencer (Eds). *International Workshop on Underwater Welding of Marine Structures*. New Orleans. Louisiana. USA. 1994. pp. 315-350.
3. E. Pereira. *Estudo da variação da porosidade ao longo do cordão em soldas subaquáticas molhadas*. Tese apresentada ao curso de Doutorado em Engenharia Mecânica da UFMG. Belo Horizonte 2007. pp.157.
4. U.S. Navy. *Underwater Cutting & Welding Manual*. S0300-BB-MAN-010 0910-LP-111-3300. 1989.
5. S. Liu, F. Pérez. "Underwater Wet Welding for Offshore Structures and Pipelines in the Gulf of Mexico". *Process Maturation and Technology Transfer*. Final Report (CSM Project 4-42339). Phase II Joint Research Program between MMS and IMP. 2006. pp. 86.
6. L. Perdomo, A. Bracarense, E. Pessoa, R. Quintana. "Factibilidad de mejorar el desempeño de los electrodos rútilicos, para la soldadura subacuática mojada, sólo modificando la primera capa barniz." *XXXIII CONSOLDA Congreso Nacional de Soldagem, 2007, Caxias do Sul*. São Paulo : Associação Brasileira de Soldagem. 2007.
7. P. Mondenesi, P. Marques, D. Santos. "Influências Metalúrgicas no Metal Fundido" *Introdução à Metalurgia de Soldagem*. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Belo Horizonte. 2004. pp. 10.
8. S. Liu, D. Olson, S. Ibarra. "Electrode Formulation to reduce weld metal hydrogen and porosity". *OMAE, Materials Engineering, ASME* Vol. II. 1994. pp. 291-298.
9. J. Cruz, R. Cabral, R. Silva, R. Pinheiro. "Reações Metalúrgicas na Soldagem Subaquática Molhada". *Rev. Soldagem & Inspeção*. Vol. 8. 2003. pp. 94-102.
10. A. Bracarense, L. Perdomo, E. Caires, R. Quintana, E. Maluf. "Desarrollo de electrodos tubulares revestidos para la soldadura subacuática mojada". *XXXII CONSOLDA - Congreso Nacional de Soldagem, 2006*. Belo Horizonte. XXXII CONSOLDA. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem. 2006.
11. [http://www.esab.com.br/br/por/Produtos/consumiveis/eletrodos/upload/1900295rev25\\_CatalogoEletrodos\\_pt.pdf](http://www.esab.com.br/br/por/Produtos/consumiveis/eletrodos/upload/1900295rev25_CatalogoEletrodos_pt.pdf). Consultada el 15 de mayo de 2009.