

## **Perspectiva de uso del poliestireno expandido, como alternativa de impermeabilizante, para electrodos empleados en la soldadura subacuática mojada**

### **Perspective of use of expanded polystyrene as an alternative waterproof coating for electrodes used in underwater wet welding**

*Lorenzo Perdomo González<sup>1\*</sup>, Alexandre Queiroz Bracarense<sup>2</sup>, Rafael Quintana Puchol<sup>1</sup>, Ezequiel Caires Pereira<sup>3</sup>, Manuel Rodríguez Pérez<sup>1</sup>, Alejandro Duffus Scott<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS). Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV). Carretera a Camajuaní km 5½. CP 54 830. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica. Laboratorio de Robótica. Soldadura y Simulación. Universidad Federal de Minas Gerais. Av. Antônio Carlos, No 6627. Pampulha, 31270-901 Belo Horizonte. Minas Gerais, Brazil.

<sup>3</sup>Departamento de Mecánica Industrial. Instituto Federal de Minas Gerais. Campus Betim. Avenida Professor Mário Werneck, 2590, Bairro Buritis, Belo Horizonte, Minas Gerais Brazil.

(Recibido el 11 de Julio de 2011. Aceptado el febrero 15 de 2012)

#### **Resumen**

La soldadura subacuática mojada, usando el proceso manual con electrodo revestido (SMAW), es actualmente la técnica más empleada para realizar trabajos de reparación en condiciones subacuática (mojada), debido a las características de maniobrabilidad propias del proceso. El revestimiento es la parte estructural del electrodo que más influye sobre su campo de aplicación, por tanto su impermeabilización es requisito indispensable, la cual se realiza mediante la aplicación de capas impermeables sobre el mismo, utilizándose habitualmente para esta operación resinas, ceras, parafinas o barnices. En el trabajo se presenta una evaluación preliminar, acerca del uso del poliestireno reciclado como alternativa para la fabricación de un impermeabilizante para estos electrodos, abordándose las características principales de su preparación y forma de aplicación. Para realizar la evaluación de este nuevo

---

\* Autor de correspondencia: teléfono: 053+ 042 + 23983, fax 053 + 042 + 81608, correo electrónico: lperdomo@uclv.edu.cu (L. Perdomo)

impermeabilizante, se realizaron depósitos de soldadura en lámina de agua y a 50 m de profundidad, comparándose el desempeño de los electrodos impermeabilizados con el barniz tradicional y con la nueva formulación, fundamentalmente en lo referido a la apariencia superficial del cordón y a la formación de poros en el metal depositado a 50 m de profundidad, además fue realizada la caracterización química a los depósitos obtenidos en lámina de agua. La evaluación preliminar evidenció la factibilidad de emplear el poliestireno expandido como material alternativo para la fabricación de impermeabilizante para los electrodos empleados en operaciones de soldadura subacuática mojada.

----- *Palabras clave:* soldadura subacuática, impermeabilizante, poliestireno expandido

### **Abstract**

Underwater wet welding, using shield metal arc welding (SMAW) manual process with coated electrode, is currently the most widely used technique for repair working in underwater wet conditions because its easy maneuverability characteristics. The coating is the structural part of the electrode with the greatest influence on its scope, so that its waterproofing is a prerequisite, which is performed by applying impermeable layers on it, commonly used for this operation, resins, waxes, paraffins or varnishes. This paper presents a preliminary assessment regarding the use of recycled polystyrene as an alternative for waterproof for these electrodes, addressing the main features of their preparation and application form. To evaluate this new waterproof, weld deposits were made with coated electrodes painted with polystyrene at a water depth of 50 m, comparing the performance of it with traditional varnishes, mainly with regard to the surface appearance of weld bead and the formation of pores in the weld metal. The chemical characterization of deposits obtained at a water depth also was performed. The preliminary results of the evaluation showed the feasibility of using expanded polystyrene as an alternative material for the manufacture of waterproofing for the electrodes used in underwater wet welding.

----- *Keywords:* underwater welding, waterproofing, expanded polystyrene

### **Introducción**

En la actualidad muchas son las operaciones de construcción y reparación de tuberías e instalaciones realizadas, mediante Shielded Metal Arc Welding (SMAW), en condiciones subacuática mojada. En todos los casos los electrodos macizos revestidos utilizados deben ser impermeabilizados, mediante una o más operaciones de barnizado, donde el objetivo principal es evitar el contacto directo entre agua y el revestimiento, permitiendo

de esta manera disminuir la absorción de agua y preservar su consistencia física [1, 2].

De forma general muchos son los factores que pueden influir sobre las características y propiedades de los depósitos de soldadura realizados en condiciones subacuáticas mojadas, encontrándose pocos reportes que aborden la influencia del impermeabilizante sobre las propiedades de los cordones. Se reporta que el

tipo de recubrimiento puede tener un efecto significativo sobre la composición química, especialmente el contenido de carbono del metal de soldadura [1]. Se plantea en la literatura [3] que los impermeabilizantes no deben dejar residuos orgánicos cuando se funden o combustionan durante el proceso de soldadura.

Investigaciones conjuntas realizadas, entre el Laboratorio de Robótica Soldadura y Simulación (LRSS) de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG) en Brasil y el Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS) de la Universidad Central de Las Villas (UCLV) en Cuba, permiten afirmar que la capa de impermeabilizante puede ser aprovechada para ejercer influencia positiva sobre los depósitos obtenidos. Las primeras experiencias consistieron en realizar modificaciones al barniz impermeabilizante mediante la incorporación de una mezcla reactiva exotérmica a la primera capa, lo cual permitió el empleo de prototipos de electrodos tubulares revestidos en la soldadura subacuática mojada, donde la combinación de capas (activa-impermeabilizante) incrementó la actividad metalúrgica de la parte exterior del electrodo sin que se afectara el grado de impermeabilización, observándose además, que los electrodos tubulares revestidos y cubiertos con barniz modificado con mezclas pirometalúrgicas mostraron mejor comportamiento tecnológico en una capa de agua de 1.0 m [4].

A partir de los resultados obtenidos con los electrodos tubulares, se han realizado algunos estudios encaminados a evaluar la influencia de la composición de la capa de barniz impermeabilizante sobre las características de los cordones realizados en condiciones de la soldadura subacuática mojada, demostrándose que la incorporación de una mezcla reactiva exotérmica (pirometalúrgica) en la primera capa de barniz permite disminuir los niveles de porosidad en cordones realizados con electrodos rútilicos E 6013 y E 7024 a 50 m de profundidad y permite además, una mejora significativa en el desempeño tecnológico de los electrodos [5].

Varios han sido los compuestos químicos utilizados para impermeabilizar los electrodos utilizados en

la soldadura subacuática mojada, destacándose las resinas, ceras o parafinas, barnices, entre otros [1,2]. Muchos de estos productos son fabricados por empresas especializadas, manteniendo las formulaciones bajo secreto industrial, lo cual puede ser confirmado por la poca cantidad de publicaciones referidas al tema.

Una variante interesante que se estudia como impermeabilizante alternativo, es emplear una solución de poliestireno expandido en un solvente orgánico, mediante la cual se puede lograr un alto grado de impermeabilización. Este producto ya ha sido utilizado evaluado anteriormente en el desarrollo de un impermeabilizante para exteriores, lo cual avala las posibilidades de uso del mismo en esta nueva aplicación [6].

El poliestireno expandido (PSE) es un polímero vinílico que estructuralmente es una cadena hidrocarbonada,  $- [C_8H_{10}]_n -$ , con un grupo fenilo ( $C_6H_6$ ) unido cada dos átomos de carbono [7]. El PSE es actualmente el cuarto plástico más consumido por detrás del polietileno, el polipropileno y el PCV y es, además, un residuo contaminante muy resistente a la acción del medio ambiente y del agua del mar [7].

La utilización del poliestireno expandido, como impermeabilizante pudiera influir en las características del baño metálico, de dos maneras diferentes. Primero a partir de su combustión, donde el aporte de una determinada cantidad de calor al baño, puede favorecer el proceso y segundo, mediante el desprendimiento de una cantidad adicional de CO, el que pasará a formar parte activa de los gases en la zona del arco, influyendo sobre el equilibrio de los mismos con su posible influencia sobre la composición y propiedades de los depósitos obtenidos. De producirse esta contribución sobre el baño, deben lograrse determinadas modificaciones en las principales propiedades de los depósitos (composición química, estructura, niveles de porosidad y contenido de hidrógeno).

Por otra parte el poliestireno expandido tiene actualmente múltiples aplicaciones, como son la preparación de cubiertas, el aislamiento térmico, el embalaje de equipos, transportación,

almacenamiento de alimentos, entre otras, esto hace que generen grandes volúmenes de residuos sólidos de este polímero, el que presenta una alta estabilidad química, convirtiéndose en un contaminante del medio ambiente [8, 9].

El objetivo del presente trabajo, es realizar una evaluación preliminar acerca de las posibilidades de empleo del poliestireno expandido (reciclado), como impermeabilizante para los electrodos revestidos empleados en condiciones de soldadura subacuática mojada.

### Materiales y métodos

Durante el desarrollo de los experimentos se emplearon electrodos rútilicos comerciales del tipo E 6013 de 5 mm de diámetro, planchas de acero A 572-50 [10] cuya composición química se muestra en la tabla 1. Como impermeabilizantes se utilizó barniz vinílico 4800/10 (resina vinílica y solventes aromáticos) y láminas de poliestireno expandido (reciclable), las que fueron disueltas en una solución de solventes orgánicos.

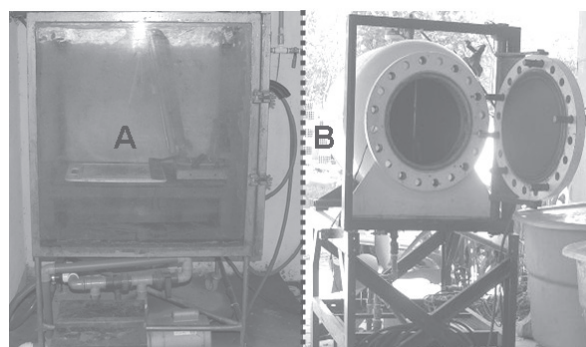
**Tabla 1** Composición química del acero A 572 – 50 (% peso)

C	Si	Mn	P	S	Nb	V
0,23	0,40	1,35	0,04	0,05	0,05	0,006
máx.	máx.	máx.	máx.	máx.		

Para preparar el impermeabilizante, se adicionó progresivamente el poliestireno a la solución de solventes, manteniendo la solución resultante en constante agitación, hasta lograr la concentración deseada. La solución de poliestireno preparada y homogenizada, fue conservada en un recipiente cerrado herméticamente, para evitar la evaporación de los solventes.

La impermeabilización, se realizó mediante la inmersión de los electrodos resacados en un recipiente tubular, operación que se realiza dos veces, teniendo en cuenta que la segunda inmersión debe ser realizada después de transcurrida una hora de la primera impermeabilización.

Los depósitos de soldadura se realizaron, un día posterior al proceso de impermeabilización, en lámina de agua (a 0,5 m en un acuario) y a 50 m de profundidad en un tanque presurizado, utilizándose un dispositivo de soldadura por gravedad, el cual fue colocado dentro de los recipientes utilizados para el agua. En la figura 1A y 1B, se pueden observar las instalaciones empleadas para realizar las soldaduras.



**Figura 1** Equipamiento empleado para la realización de los depósitos de soldadura, A: Acuario con el dispositivo de soldadura por gravedad, B: Tanque presurizado

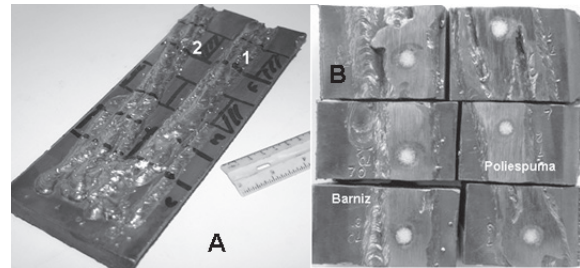
Para realizar los depósitos en lámina de agua, se prepararon tres planchas de acero de 250 mm de largo, 100 mm de ancho y 17 mm de espesor, y en cada una de ellas se realizaron dos cordones, empleando una intensidad de corriente de soldadura de 230 A. De la misma manera se preparó una probeta, para realizar la evaluación a 50 m de profundidad, empleándose en este caso, una intensidad de corriente de soldadura de 290 A.

La caracterización química fue realizada a los depósitos obtenidos en lámina de agua, para lo cual se realizaron varios cordones sobre una plancha de acero A 572-50. Posteriormente fueron cortadas, en una sierra mecánica con refrigerante, probetas de ensayo entre 30 y 35 mm de ancho en el inicio, centro y final del cordón. Los cordones de cada una de las probetas fueron desbastados en una fresadora para garantizar la determinación de su composición química mediante espectroscopia de emisión atómica.

En la figura 2A, se pueden observar, las probetas preparadas para el análisis químico a partir de los depósitos obtenidos en lámina de agua y las huellas dejadas por el espectrógrafo durante la caracterización, aparecen en la figura 2B. Los resultados de la caracterización, se muestran en la tabla 2.

La porosidad de los depósitos realizados a 50 m de profundidad fue medida a partir de la relación entre el área ocupada por los poros y el área total del depósito en la sección transversal del cordón. Para determinar el valor de ambas áreas, se utilizó el Software Quantikov, cuyas muestras fueron atacadas con Nital (solución de ácido nítrico al 2% en etanol). Los resultados promedio del valor del área correspondiente a los poros, se muestran en la tabla 3. De cada cordón se tomaron 3 secciones, las

que fueron analizadas por ambos lados, resultando un total de 6 muestras por depósito.



**Figura 2** (A) Depósitos realizados con electrodos E 6013 en lámina de agua con electrodo protegido con barniz comercial (1) y con poliespuma (2) para análisis químico y (B) huellas del análisis químico por emisión espectral

**Tabla 2** Composición química de los depósitos obtenidos, en lámina de agua, con electrodos E 6013 impermeabilizados con barniz comercial y con poliestireno

Muestra		Elementos (%)										
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	Al	Cu	V
<b>COM</b>	Inicio	0,056	0,138	0,351	0,027	0,010	0,010	0,011	0,005	0,006	0,008	0,006
	Medio	0,063	0,114	0,331	0,026	0,020	0,009	0,012	0,006	0,007	0,008	0,005
	Final	0,060	0,175	0,351	0,028	0,021	0,012	0,012	0,006	0,009	0,018	0,007
	Media	0,060	0,142	0,344	0,027	0,020	0,010	0,012	0,006	0,007	0,006	0,006
<b>POL</b>	Inicio	0,071	0,157	0,383	0,027	0,022	0,013	0,012	0,005	0,007	0,014	0,005
	Medio	0,074	0,147	0,332	0,027	0,023	0,012	0,013	0,006	0,009	0,018	0,005
	Final	0,077	0,176	0,456	0,027	0,021	0,015	0,012	0,005	0,008	0,014	0,006
	Media	0,074	0,160	0,390	0,027	0,022	0,013	0,012	0,005	0,008	0,015	0,015

COM: barniz comercial, POL: barniz de poliestireno expandido

**Tabla 3** Resultados del análisis de porosidad en los depósitos realizados a 50 m con electrodos E 6013 impermeabilizados con barniz comercial y con la nueva formulación

	Muestra	Área poros (mm <sup>2</sup> )	Área cordón (mm <sup>2</sup> )	Porosidad (%)	
<b>Barniz comercial</b>	801F	1,7860	31,1340	5,74	
	801D	1,7796	43,9020	4,05	
	802F	0,5052	32,7857	1,54	
	802D	0,916	37,3570	2,45	
	803F	1,0860	36,5979	2,97	
	803D	1,0588	37,1915	2,85	
		Promedio			3,27
		Variación estándar			Sx=1,46
	Varianza			V=0,4465	

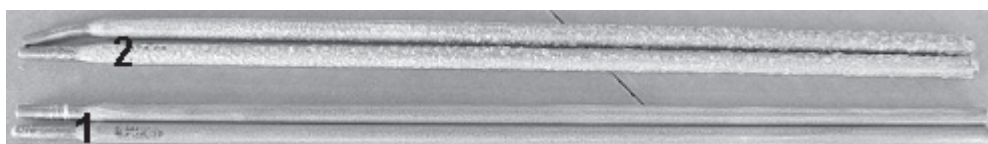


	<b>Muestra</b>	<b>Área poros (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Área cordón (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Porosidad (%)</b>
<b>Poliestireno expandido</b>	81F	1,4662	32,7712	4,47
	81D	0,5345	26,1860	2,04
	82F	0,2909	28,6322	1,06
	82D	0,4933	29,1744	1,69
	83F	1,4447	36,1785	3,99
	83D	1,1930	33,8159	3,53
		Promedio		
	Variación estándar			S=1,38
	Varianza			V=0,492

### Resultados y discusión

La preparación del impermeabilizante debe hacerse de manera que disminuya la evaporación del solvente, tratando siempre de evitar un aumento de la viscosidad del barniz. Durante la impermeabilización la velocidad de inmersión y extracción del electrodo de la solución de poliestireno debe ser

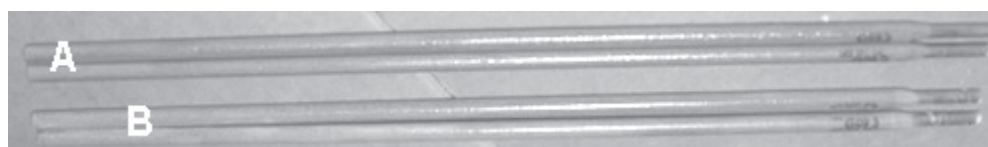
constante para todos los electrodos de forma tal que no varíe el espesor de la capa incorporada. Un aspecto importante a destacar, es el control en el número de capas de barniz aplicadas sobre los electrodos, debido a que cuando se aplican más de dos capas el solvente tiende a disolver las capas interiores, lo cual hace que se tornen muy irregulares. Este aspecto puede ser observado en la figura 3.



**Figura 3** Electrodos impermeabilizados con dos (1) y con tres capas de poliestireno (2)

La aplicación de la capa impermeabilizante con la solución de poliestireno expandido sobre los electrodos de la forma señalada permite la

obtención de capas uniformes, mostrando una apariencia similar a se obtienen con la aplicación del barniz comercial (ver figura 4).

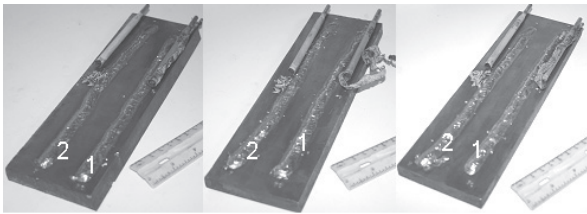


**Figura 4** Electrodos impermeabilizados con el barniz comercial (A) y con poliestireno (B)

La evaluación del comportamiento tecnológico de los electrodos, en lámina de agua, se realizó de manera cualitativa, observándose en ambos casos, un adecuado encendido del arco de soldadura, sin interrupciones durante la realización de los depósitos, lo cual se corrobora con la buena apariencia de todos los depósitos realizados, según se aprecia

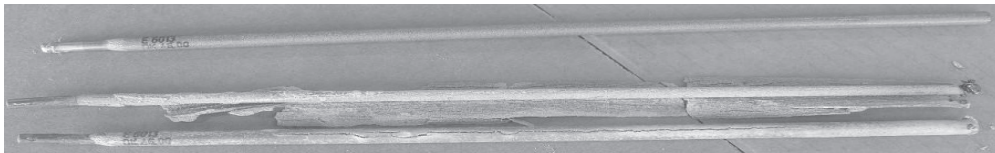
en la figura 5, donde el primer cordón (1) corresponde a los electrodos impermeabilizados con barniz comercial de la forma tradicional, y el segundo cordón (2), se realizó con los electrodos protegidos con la solución de poliestireno, es de destacar que la apariencia superficial de los cordones fue similar con ambos impermeabilizantes.

En la figura 5, también se pueden observar los residuos de impermeabilizante que quedan después de realizada la soldadura, apreciándose que el residuo del barniz comercial queda en forma de royo y el de barniz de poliestireno es granulado lo cual pudiera ser un indicio de la posible participación del impermeabilizante en las reacciones químicas que ocurren durante el proceso de soldadura, mediante su combustión.



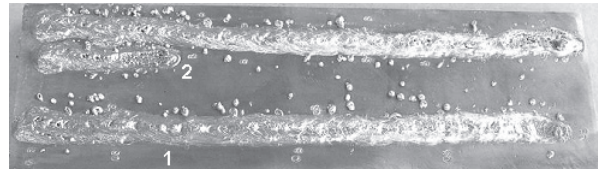
**Figura 5** Depósitos de soldadura realizados en lámina de agua con electrodo E 6013 impermeabilizados con barniz comercial (1) y con solución de poliestireno (2)

En el caso de los cordones realizados a 50 m, de igual manera se observó un comportamiento tecnológico semejante con ambos barnices, así como el mismo nivel de salpicaduras, dado esto por las condiciones en que se realizó la soldadura (ver figura 6).



**Figura 7** Electrodo con el revestimiento dañado una vez que son sometidos a 50 m de profundidad y es iniciado el proceso de soldadura

Referente a la composición química de los cordones obtenidos en lámina de agua (ver tabla 2), no se aprecian diferencias significativas en la composición química entre el electrodo protegido con barniz comercial y el electrodo protegido con poliestireno, sin embargo si se puede observar una ligera tendencia a aumentar los contenidos de carbono, silicio y manganeso para los cordones obtenidos con el barniz de poliestireno reciclado, lo cual es más evidente si se determina



**Figura 6** Depósitos de soldadura realizados a 50 metros de profundidad con electrodo E 6013 impermeabilizados con barniz comercial (1) y con poliestireno (2)

En el volumen de agua donde se realizaron los depósitos de soldadura se observó la presencia de pequeñas partículas dispersas de carbono, las que flotan o se depositan sobre las paredes de la piscina.

Debe destacarse que cuando se realizaron los depósitos de soldadura a 50 m de profundidad, empleando el impermeabilizante base poliestireno, la capa de barniz de algunos electrodos se dañó apreciablemente a lo largo del electrodo (ver figura 7), efecto que tendía a ocurrir una vez que se iniciaba el proceso de soldadura. Una tendencia al agrietamiento de la capa de barniz de poliestireno también se pudo observar cuando el electrodo tenía varios días de impermeabilizado por lo cual se recomienda su empleo lo antes posible.

la composición promedio para cada depósito. Para el resto de los elementos, los contenidos son prácticamente los mismos para ambos electrodos.

El mayor contenido de carbono puede ser justificado a partir de la descomposición del poliestireno, que produce una determinada cantidad de carbono coloidal libre durante el proceso de soldadura, del cual una gran parte queda suspendida en el agua, parte pasa al cordón y una pequeña parte interactúa con el

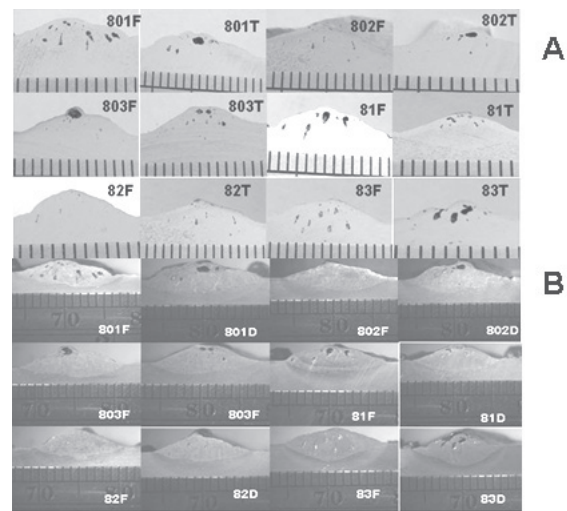
cordón y con el oxígeno de la descomposición del vapor de agua, protegiendo de esta manera el manganeso y silicio presentes en el baño de soldadura, aumentando los coeficientes de transferencia de dichos elementos, justificándose así su mayor presencia en el cordón realizado con el impermeabilizante de poliestireno.

Referente a la medición de la porosidad, a 50 metros de profundidad, en la tabla 3 se dan los resultados para los depósitos realizados con barniz comercial y con poliestireno, observándose que la porosidad varía desde un 1,5% hasta un 5,74% para el barniz comercial con un promedio de 3,27 y desde 1,06% hasta un 4,47% para el barniz de poliestireno con un promedio de 2,80, apreciándose que los valores obtenidos con esta última variante son ligeramente inferiores a los obtenidos con el barniz comercial. No obstante en ambos casos los valores son bastante variables, independientemente del tipo de impermeabilizante debido a la forma en que se toman las probetas. Esta ligera disminución, en la porosidad, puede estar influenciada por el efecto de la descomposición del poliestireno, quien deja una determinada cantidad de carbono libre durante el proceso de soldadura que puede reaccionar con el oxígeno presente en el baño disminuyendo con esto su influencia negativa en la formación de poros.

En la figura 8 se muestra una foto de los cordones utilizados para la determinación de la porosidad, donde se puede comprobar la variabilidad en cuanto a porosidad entre las diferentes probetas para ambos impermeabilizantes.

Leyenda: 80: Impermeabilizado con barniz comercial y 8: Impermeabilizado con barniz de poliestireno. 1: Muestra del inicio, 2: Muestra del medio, 3: Muestra del final, F: Frente de la probeta y T: Parte trasera de la probeta.

La influencia del poliestireno expandido, que impermeabiliza el electrodo, sobre la composición química y porosidad del depósito obtenido, puede ser valorada del modo que se expone a continuación.



**Figura 8** Depósitos realizados con electrodos E 6013 a 50m de profundidad, impermeabilizados con barniz comercial y poliestireno utilizados para determinar la porosidad. A: Para medir el área de los poros, B: atacada con nital para medir área del cordón

El alma (núcleo metálico) junto con el revestimiento a lo largo del electrodo [ $L = (350 \pm 0,5)$  mm] presenta un diámetro promedio de ( $D_{elec}$ ) de ( $7,4 \pm 0,05$ ) mm. El valor promedio de la masa ( $m_b$ ) de la capa de barniz ( $x_b$ , mm) adherida a la superficie del revestimiento es de ( $0,6158 \pm 0,053$ ) g. Al barniz seco se le determinó gravimétricamente la densidad presentando un valor promedio de ( $\rho = 1,048 \pm 0,001$ ) g/cm<sup>3</sup>, que coincide aceptablemente con él reportado por Scheiro [7] de 1,05 g/cm<sup>3</sup>.

El cálculo de la área de la capa de barniz de poliestireno ( $A_{ps}$ ) se determinó considerando que el electrodo impermeabilizado como un cilindro regular acorde a la fórmula siguiente:

$$A = \frac{1}{4} \pi [(D_{elect} - 2x_b)^2 - D_{elect}^2] \quad (1)$$

A partir de la ecuación (1) se calcula el espesor de la capa de barniz ( $\bar{x}_b$ , mm) considerando la masa del mismo,  $m_b$ :

$$m_b = \frac{1}{4} \pi [(D_{elect} - 2x_b)^2 - D_{elect}^2] \cdot L \cdot \rho \quad (2)$$



Sustituyendo todos los valores de los parámetros experimentales enunciados arriba en la ecuación (2) se obtiene una ecuación de segundo grado:

$$x_{b00}^2 + 7,4x_b - 0,5344 = 0 \quad (3)$$

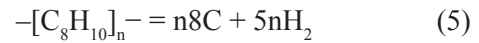
La solución de la ecuación (3), teniendo en consideración las oscilaciones de los valores de los parámetros que intervienen, da como resultado que el espesor de la capa de barniz es:

$x_b = (0,07153 \pm 0,00048)$  mm, valor que indica una aceptable regularidad en el espesor de la capa del impermeabilizante.

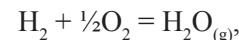
El tiempo de consumo del electrodo barnizado, usando un equipo accionado por gravedad bajo el agua a una presión de 6 atmósferas, es de 58,5 s. Las cantidades promedios de masa de impermeabilizante de poliestireno por unidad de longitud y tiempo son 1,76  $\mu\text{g}/\text{mm}$  y 0,6  $\mu\text{g}/\text{s}$ , respectivamente. Además se determinó la profundidad del cráter en la punta del electrodo, donde se produce el arco, que es como promedio 2,5 mm. A partir de este dato se calculó, usando la fórmula de un cono truncado, la cantidad de agua desplazada por el arco como vapor, siendo ésta 0,072  $\text{cm}^3$ . La cantidad promedio de burbujas determinadas en un segundo es aproximadamente 13 [11], lo que indica un flujo de 286  $\text{cm}^3/\text{s}$  de vapor de agua. Considerando que el 86 % de esa cantidad de agua líquida se convierten en vapor a 3000 K y a 50 m de profundidad, entonces el volumen de la burbuja formada es de 22  $\text{cm}^3$ . Según Quintana-Puchol [11], el vapor de agua a 1 atm de presión y a 3000 K se descompone sólo el 20,5 % en sus componentes (H, H<sub>2</sub>, O, O<sub>2</sub>, OH, ver ecuación (4)) [12], pero a 50 m de profundidad ( $P_T = 6$  atm) el grado de disociación se reduce en 1,81 ( $\alpha = \sqrt[3]{P_T}$ ), pero su concentración aumenta en 3,3 veces ( $P_T/\alpha$ ), provocando que se tenga a esa profundidad más poros en el cordón de soldadura que en una lámina de agua de 1 m de profundidad [11].



Simultáneamente, el impermeabilizante se descompone, aportando 0,0095 g de carbono y 0,0011 g de hidrógeno a la burbuja formada:

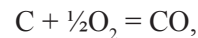


Por las características del carbono e hidrógeno, formado por la descomposición del impermeabilizante de poliestireno (PS) bajo la acción del calor del arco difundido a través del revestimiento y parcialmente por su acción directa, contribuyen a reducir el efecto oxidante del oxígeno y a la formación de poros por el hidrógeno (ecuación 5). Esto se debe a que los gases que se desprenden del impermeabilizante, obliga a establecer un nuevo equilibrio hacia la formación de H<sub>2</sub>O<sub>(g)</sub> (ecuación 4) y a la ocurrencia de reacciones exotérmicas que alargan en cierta medida el tiempo de solidificación del baño de soldadura, dando lugar a expulsar una mayor cantidad de hidrógeno:

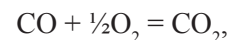


$$\Delta G = -nRT \ln K_{eq} = -60180 - 13,93T \quad (6)$$

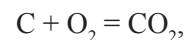
Por otro lado, el carbono de partículas muy pequeñas desprendidas de la descomposición del PS y en estado incandescente reacciona exotérmicamente con el oxígeno de la descomposición del agua (4) protegiendo de la oxidación al Mn y Si, entre otros elementos químicos, del metal de aporte, tal como la indica las ecuaciones siguientes:



$$\Delta G = -nRT \ln K_{eq} = -28100 - 20,20T \quad (7)$$



$$\Delta G = -nRT \ln K_{eq} = -60540 - 20,15T \quad (8)$$



$$\Delta G = -nRT \ln K_{eq} = -98640 + 0,05T \quad (9)$$

En las tablas 2 y 3 se muestra experimentalmente el efecto dual del impermeabilizante base poliestireno; primero, preserva la composición química a lo largo del cordón de soldadura y segundo, disminuye la ocurrencia de la adsorción

de gases, que provocan la formación de poros en el cordón.

## Conclusiones

El comportamiento tecnológico de los electrodos y la apariencia superficial de los depósitos obtenidos en lámina de agua y a 50 m fueron muy semejantes para el barniz tradicional y el poliestireno expandido, no apreciándose diferencias significativas entre ambos impermeabilizantes.

En la evaluación preliminar realizada, en lámina de agua, con el poliestireno expandido como impermeabilizante de electrodos para soldadura subacuática mojada se pudo observar que los contenidos promedios de carbono, manganeso y silicio son ligeramente superiores en los depósitos obtenidos con este impermeabilizante que los obtenidos con el impermeabilizante tradicional.

En la evaluación preliminar realizada a 50 m de profundidad se pudo observar que la formulación propuesta a partir de poliestireno expandido genera un nivel promedio de porosidad inferior al que produce el impermeabilizante tradicional, independientemente de la tendencia al agrietamiento de la capa de barniz para la soldadura en estas condiciones.

El impermeabilizante obtenido de la disolución de poliestireno expandido presenta durante la soldadura subacuática mojada efectos protectores que atenúa, en gran medida, el efecto oxidante del oxígeno, surgido de la descomposición del agua, sobre los elementos químicos de los metales de aporte y base y disminuye, en cierta medida, la formación de poros a profundidades de 50 m, fenómenos que mejoran las propiedades mecánicas del cordón y que son efectos que se derivan de la ecuación global:  $PS + 10,5n O_2 = 5n H_2O + (8-x-y)n C + xn CO_2 + ynCO + Q$

La evaluación preliminar realizada permite afirmar que el poliestireno expandido constituye una alternativa factible para la fabricación de impermeabilizantes de electrodos empleados en operaciones de soldadura subacuática mojada,

con la correspondiente contribución a la preservación del medio ambiente.

## Agradecimientos

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

## Referencias

1. M. Rowe, S. Liu. "Recent developments in underwater wet welding." *Science and Technology of Welding and Joining*. Vol. 6. 2001. pp. 387
2. U. Navy. *Underwater Cutting & Welding Manual S0300-BB-AN-10 0910-LP-111-3300 1*. Published by direction of commander, naval sea systems command distribution. April 1989 Change B Dated 1 June 2002. pp. E-22, E-23. Disponible en: [http://hnsa.org/doc/pdf/cut\\_weld.pdf](http://hnsa.org/doc/pdf/cut_weld.pdf)
3. S. Findlan, M. Phillips. *Method of manufacturing welding electrode for underwater welding*. Patent N° 5, 436, 428 July 25. 1995.
4. A. Bracarense, L. Perdomo, E. Pereira, R. Quintana. "Development of tubular coated electrodes for underwater wet welding." *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*. Vol. 32. 2009. pp. 89 - 97.
5. A. Bracarense, E. Pereira, L. Perdomo, R. Quintana. "Influencia de la composición física de la capa de barniz impermeabilizante de electrodos rutilicos sobre la porosidad en la soldadura subacuática mojada." *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*. N.º 50. 2009. pp. 41-52.
6. Boletim UFMG. *UFMG desenvolve impermeabilizante inédito a partir de rejeitos de isopor*. N° 1544 - Ano 32. <http://www.ufmg.br/boletim/bol1544/index.shtml>. Consultado el 21 de agosto de 2006.
7. J. Sheirs, L. Alexander y B. Vainshtein. *Modern styren polymers*. Ed. John Wiley and Sons. New York. 2003. pp. 309.
8. Textos científicos.com. *Reciclado del poliestireno expandido*. disponible en: <http://www.textoscientificos.com/polimeros/poliestireno/reciclado>. Consultado el 22 de octubre de 2005.
9. Proyecto ECO EPS para el *Reciclado de envases y embalajes de poliestireno expandido usados*. Proyecto ECO-EPS. disponible en: <http://www.anape.es/pdf/eco-eps.pdf>. Madrid (España). Consultado en junio de 2008.

10. *Manual de Especificaciones y Garantías AHMSA MEGA 02* 4a. ed. - No. Documento: VP117-00-M-01-02. Junio 2009. Disponible en: [www.ahmsa.com](http://www.ahmsa.com)
11. R. Quintana, L. Perdomo, A. Duffus, A. Bracarense, E. Pereira. "Consideraciones termodinámicas entre la formación de poros y la presión hidrostática durante la soldadura subacuática mojada." *Revista Soldagem e Inspeção*. Vol. 14. 2009. pp. 161-169
12. R. Quintana, L. Perdomo, A. Bracarense, E. Pereira. "Valoración termodinámica de la descomposición del vapor de agua a 1 atmósfera por la acción de un arco eléctrico y solubilidad del hidrógeno en hierro líquido." *Revista Afinidad LXVI*. Vol. 542. 2009. pp. 320-325.