

## Development of tubular coated electrodes for underwater wet welding

**Alexandre Queiroz Bracarense<sup>1</sup>, Lorenzo Perdomo González<sup>2</sup>,  
Ezequiel Caires Pereira Pessoa<sup>3</sup> y Rafael Quintana Puchol<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil. Bracarense@ufmg.br

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS), Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV), Cuba. {lperdomo,rquin}@uclv.edu.cu

<sup>3</sup>Centro Federal de Educação Tecnológica de Ouro Preto, UNED-Congonhas, Brasil. ezequielcaires@yahoo.com.br

### Abstract

The structural configuration of the tubular coated electrodes offers an attractive field of metallurgical and technological investigation on the underwater wet welding. For this reason, in this work the developed experiments with tubular coated electrodes using as base the covering of the rutile electrode (6013) are presented. Three different powder mixtures were formulated and filled the tubular wires cavities. Finally two electrodes were selected and the waterproof varnish with pirometallurgical mixtures was modified. The deposits were made in an aquarium with a water layer of 1 m. The obtained results revealed that the mixture formed by manganese oxide and aluminum as inside the electrode as in the waterproof varnish offered the best results in the technological and metallurgical behaviors of the underwater wet welding, showing that the tubular coated electrodes constitute a viable alternative for the development of consumable for the wet welding process.

**Key words:** Underwater wet welding, tubular coated electrode.

## Desarrollo de electrodos tubulares revestidos para la soldadura subacuática mojada

### Resumen

La configuración estructural de los electrodos tubulares revestidos brinda un atractivo campo de investigación metalúrgica y tecnológica en la soldadura subacuática mojada. Por esta razón, en este trabajo se presentan los experimentos desarrollados con electrodos tubulares revestidos usando como base el revestimiento rutilico (6013). Se formularon tres diferentes mezclas de polvos, con las cuales se llenaron las cavidades de los alambres tubulares. Finalmente se seleccionaron dos electrodos a los cuales se les aplicó el barniz impermeabilizante modificado con mezclas pirometalúrgicas. Los depósitos se realizaron en un acuario con una capa de agua de 1 m. Los resultados obtenidos revelaron que la mezcla pirometalúrgica formada por óxido de manganeso y aluminio tanto en el interior del electrodo como en el barniz impermeabilizante brindó los mejores resultados en el comportamiento tecnológico y metalúrgico de la soldadura subacuática mojada, mostrando que los electrodos tubulares revestidos constituyen una alternativa viable para el desarrollo de consumibles para el proceso de soldadura mojada.

**Palabras clave:** Soldadura subacuática mojada, electrodo tubular revestido.

## 1. Introducción

Un electrodo macizo revestido común para la soldadura manual (SMAW) está constituido por dos partes fundamentales: el núcleo metálico y el revestimiento, como puede ser observado en la Figura 1. El núcleo está formado por una varilla metálica de acero de bajo contenido de carbono (0,10% C como máximo), aunque en casos específicos puede estar constituido por otro tipo de acero. El aporte másico del núcleo en la formación del cordón de soldadura está entre el 80 y 95%, además es el responsable del establecimiento del arco eléctrico.

El revestimiento que cubre a la varilla metálica está constituido por minerales aluminosilicáticos, óxidos, sales, compuestos orgánicos, polvo de hierro metálico y de ferroaleaciones, entre otros, donde todos estos constituyentes son aglomerados mediante un aglutinante: silicatos de sodio y/o potasio o por compuestos orgánicos [1, 2]. Entre las funciones del revestimiento se circunscriben fundamentalmente: crear alrededor del baño metálico una atmósfera de gases protectores ( $\text{CO}_2$  y otros) de la acción de los gases atmosféricos (aire fundamentalmente 23%-Vol de  $\text{O}_2$  y 75%-Vol de  $\text{N}_2$ ), garantizar la estabilidad del arco, establecer las características metalúrgicas de la escoria e influir en las propiedades físico-mecánicas y químicas del cordón de soldadura. La relación másica entre la varilla metálica y el revestimiento define una serie de funciones y objetivos del proceso de soldadura, donde esta relación puede variar en un amplio diapason de acuerdo al tipo de electrodo. Por lo general, el revestimiento es la parte del electrodo que define el campo de aplicación del electrodo, por lo que su formulación ha sido punto de partida para el desarrollo de consumibles destinados a la soldadura subacuática mojada.

Es frecuente encontrar informaciones sobre investigaciones referente a modificaciones de la composición de revestimientos base rútilicos impermeabilizados de electrodos con alambre macizo, comprobando su eficiencia a 10 m de profundidad [3]. Otros autores han añadido manganeso, titanio, boro, así como ferroaleaciones, por ejemplo FeTi a los revestimientos rútilicos valorando la interacción entre los elementos, especialmente entre el Mn y Ti a 100 m de pro-

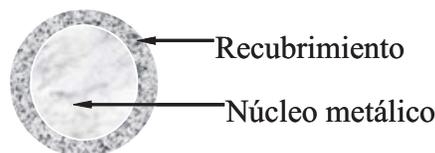


Figura 1. Representación esquemática de un electrodo macizo.

fundidad y sus efectos sobre la microestructura y la porosidad [4].

Adiciones de compuestos portadores de oxígeno como la hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) al revestimiento rútilicos han sido estudiadas a diferentes profundidades, provocando una inversión en las relaciones entre el hidrógeno en la fase gaseosa y el oxígeno en sus contenidos en el baño de soldadura [5].

Estudios sobre el comportamiento metalúrgico y tecnológico de los componentes que se añaden a la cavidad tubular de los electrodos tubulares revestidos e impermeabilizados destinados a la soldadura subacuática mojada son inexistentes. Recientes estudios sobre los efectos metalúrgicos que ocurren por la adición de carburo de calcio y aluminio en polvo en la cavidad tubular de electrodos tubulares revestidos base rutilo se valoraron, explicando las interacciones en condiciones subacuática mojada [6].

El desarrollo de electrodos tubulares revestidos como una alternativa de nuevos consumibles para la soldadura subacuática mojada puede convertirse en un campo atractivo de investigación y desarrollo, debido a que la cavidad tubular constituye una zona de estudio, donde pueden realizarse múltiples combinaciones de diferentes constituyentes en forma de polvo, dando la posibilidad de incursionar en el campo de la metalurgia subacuática permitiendo, por tanto, disminuir la interacción del hidrógeno y el oxígeno con el metal de soldadura, además puede dar la posibilidad de aportar adicionalmente calor al electrodo, todo lo cual debe mejorar la calidad del metal depositado y, por consiguiente, las características mecánicas del cordón, en la Figura 2 se observa esquemáticamente la diferencia en cuanto estructura y composición entre un electrodo macizo (Figura 1) y uno tubular revestido.

Los electrodos tubulares revestidos cuentan con una zona de acción metalúrgica y tecnológica de gran interés, la cavidad tubular, factible

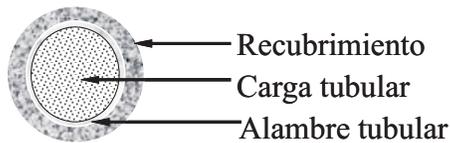


Figura 2. Representación esquemática de las características estructurales de la sección transversal de un electrodo tubular revestido.

de modificar su contenido a voluntad, lo que permite la incorporación de nuevos aditivos al proceso sin afectar “sensiblemente” las funciones propias del revestimiento del electrodo.

En la Tabla 1 se hace una comparación en cuanto a la factibilidad de desarrollo de un electrodo macizo y uno tubular para la soldadura subacuática mojada. En dicha tabla se puede observar que la estructura de electrodos tubulares brinda algunas ventajas adicionales sobre todo en cuanto a la posibilidad de incorporar componentes activos adicionales al electrodo, así como a su naturaleza.

Es condición indispensable para el desarrollo del proceso de soldadura en condiciones subacuáticas mojadas, la realización de la operación de impermeabilización de los electrodos, lo cual brinda la posibilidad de utilizar esta cubierta como zona receptora de elementos reactivos, capaces de influir sobre el desempeño tecnológico y metalúrgico del consumible.

El objetivo de este trabajo es realizar una evaluación preliminar de varios prototipos de

electrodos tubulares revestidos, evaluando la influencia que sobre el comportamiento tecnológico tiene la incorporación de mezclas de componentes pulverulentos tanto en el interior del tubo metálico como en la primera capa del barniz impermeabilizante.

## 2. Materiales y Métodos

Con el objetivo de valorar el comportamiento metalúrgico y tecnológico del contenido en las cavidades de los electrodos tubulares revestidos e impermeabilizados en la soldadura subacuática mojada se prepararon, en primera instancia, 3 tipos de electrodos tubulares revestidos empleando un alambre tubular de 4 mm de diámetro externo, 2 mm de diámetro interno y 350 mm de longitud, que fueron revestidos, manteniendo la misma formulación y espesor de los revestimientos utilizados en los electrodos macizos E 6013. La capa de impermeabilizante se aplicó por inmersión empleando un barniz comercial constituido por resina vinílica y solventes aromáticos.

A partir de una formulación clásica de revestimientos de electrodos macizos del tipo E6013 sin aglomerantes (Tabla 2) y con la granulometría adecuada  $< 100 \mu\text{m}$ , se confeccionó una masa cruda del revestimiento conteniendo 17% de silicato de potasio, la que fue aplicada a los alambres tubulares debidamente llenadas sus cavidades con las respectivas formulaciones.

Tabla 1  
Comparación entre los electrodos macizos y tubulares en cuanto a sus posibilidades de desarrollo para la soldadura subacuática mojada

| Electrodos macizos   | Electrodos tubulares revestidos  |
|--|--|
| La adición de componentes puede realizarse sólo a través del revestimiento y/o emplear alambres aleados por lo que las vías de adición y cantidad de elementos a añadir es limitada. | La adición de componentes puede realizarse a través del revestimiento y también en la cavidad tubular lo que permite lograr alta capacidad para la adición, combinación y distribución de elementos. |
| Proceso de fabricación más sencillo y gran experiencia industrial.   | Proceso de fabricación más complejo y reducida experiencia industrial.   |
| Los componentes adicionados al revestimiento pueden interactuar más directamente entre sí y alterar sus funciones metalúrgicas de diseño.  | La adición de componentes en el núcleo conduce a reacciones con mecanismos metalúrgicos diferentes a los que acontecen en los revestimientos   |
|  | Se presentan dificultades para lograr un sellaje hermético del electrodo sin alterar sus funciones.  |

Tabla 2  
Formulación clásica de revestimientos  
de electrodos rútilicos 6013

| Formulación sin aglomerante  |                  |
|------------------------------|------------------|
| Componentes                  | Contenido en %-m |
| Rutilo                       | 40               |
| ZrO <sub>2</sub>             | 10               |
| Ferromanganeso               | 14               |
| Otras ferroaleaciones        | 6                |
| Polvo de Fe                  | 2                |
| Polvo de otros metales       | 6                |
| Minerales aluminosilicáticos | 18               |
| Calcita                      | 3                |
| CMC                          | 1                |
| Suma                         | 100              |

20% de adición de silicato de potasio a 100% a la masa del polvo del revestimiento.

Características:  $\rho = 1,379 \text{ g/cm}^3$ ;  $\nu = 1,050 \text{ Pa.s}$ ; Relación molar:  $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O} = 3,3$ .

Estos electrodos tubulares revestidos fueron sometidos a un proceso de secado y calcinado hasta 350°C durante 2 horas [7].

Las formulaciones de las mezclas destinadas al interior de la cavidad del alambre tubular se variaron de la forma siguiente: 1- polvo de hierro, 2- polvo de hierro + dióxido de manganeso + polvo de Al y 3-polvo de hierro + carburo de calcio.

Los polvos metálicos empleados presentan una granulometría de  $< 100 \mu\text{m}$  para el hierro y de  $< 70 \mu\text{m}$  para el aluminio, ambos tienen una pureza superior a los 99%. De igual manera el dióxido de manganeso y el carburo de calcio (CaC<sub>2</sub>) presentan purezas superiores al 97% y la granulometría es de  $< 100 \mu\text{m}$  para ambos casos. La similitud en granulometría de los diferentes componentes empleados coadyuva a lograr una buena homogeneidad en la mezcla, pero la diferencia entre las densidades de casi el doble entre algunos componentes es un factor adverso, que se vence por la adición primero de los componentes de menor densidad y después los de mayor en el mezclador.

En la **1ra variante (polvo de Fe)** se incorpora sólo polvo de hierro a la cavidad tubular del

electrodo. Aquí el aporte metálico del alambre tubular en su conjunto es superior que la contribución de los componentes del revestimiento en la 1ra variante, pero sin alcanzar la relación correspondiente a electrodos macizos. Esto se debe a que la densidad de empaquetamiento de los polvos en la cavidad tubular alcanzada en la práctica fue alrededor del 60%, a pesar de que el polvo de Fe presenta cierta plasticidad. En el desarrollo de electrodos tubulares se acostumbra a utilizar un parámetro denominado coeficiente de llenado que no es más que la relación entre la masa de polvo adicionado a la cavidad del alambre tubular y la masa del tubo metálico. El valor del coeficiente de llenado de un electrodo tubular depende del diámetro del electrodo, dimensiones de la cinta (espesor), forma geométrica de la sección transversal del mismo, composición y densidad de los componentes de la carga aleante, etc [8].

En la **2da variante (Fe+Al+MnO<sub>2</sub>)** se evaluó la influencia que ejerce sobre el proceso de soldadura la incorporación del dióxido de manganeso (MnO<sub>2</sub>) en el interior del electrodo tubular. La adición del óxido de manganeso pretende, por un lado, constituirse como regulador, por etapas, de los niveles de oxígeno y alterar el estado de equilibrio oxígeno-hidrógeno en la fase gaseosa, lo que permite reducir la influencia del hidrógeno presente en el baño de soldadura así como en la burbuja de gases alrededor del baño metálico y, por otro lado, restituir las pérdidas de Mn ocasionadas por la oxidación en el baño de soldadura.

En la **3ra variante (Fe+CaC<sub>2</sub>)** se evaluó la influencia que ejerce sobre el proceso la adición de carburo de calcio, el cual es capaz de reaccionar de manera exotérmica con el oxígeno disminuyendo por tanto su contenido en el baño de soldadura.

A partir de estos componentes se formularon tres mezclas, denominadas variantes, cuyas formulaciones se recogen en la Tabla 3. Estos electrodos fueron cuidadosamente impermeabilizados, con dos capas, antes del proceso de soldadura utilizando un pincel, manteniendo lo más homogénea posible el espesor de la capa y comprobando la cantidad aplicada mediante pesada.

Cada uno de los prototipos de electrodos tubulares fabricados fue evaluado en condicio-

nes de soldadura subacuática mojada. La evaluación fue realizada en el acuario mostrado en la Figura 3, utilizando un dispositivo de soldadura por gravedad, empleando corriente directa con polariza invertida y una intensidad de 120 A.

Las soldaduras fueron realizadas sobre planchas de acero del tipo API-5L grado B de 250 mm de largo, 100 mm de ancho y 17 mm de espesor. La composición química del acero se muestra en la Tabla 4.

Además reconficciones dos mezclas pirometalúrgicas: *mezcla polvo a* -aluminio y óxido de manganeso y *mezcla de polvos b*: polvo de hierro, polvo de aluminio y óxido de manganeso. Cada una de estas mezclas es añadida en una concentración del 8,5% al barniz, formándose dos suspensiones homogéneas por agitación, en las cuales no se produjo ninguna alteración de sus propiedades durante 72 horas. El barniz modificado (suspensión) se aplicó sobre el revestimiento de las variantes elegidas, incorporándose  $\approx 0,7$  g de mezcla reactiva a la primera capa de barniz. Después de secada las película de los barnices modificados se añade con el mismo procedimiento otra capa de barniz puro. Es recomendable aclarar que el tamaño de las partículas de los constituyentes sólidos, 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.

Para buscar una referencia de comparación del comportamiento tecnológico de las variantes



Figura 3. Acuario utilizado en los experimentos.

elegida de los electrodos tubulares se eligió, como patrón de comparación, un electrodo comercial E6013, el cual fue impermeabilizado con el barniz puro, denominado modificación-IV. En la Tabla 5 se exponen las modificaciones aplicadas a los prototipos de electrodos tubulares y las modificaciones realizadas en la primera capa de barniz.

Con cada una de los electrodos modificados se realizaron los correspondientes ensayos de

Tabla 3  
Concentraciones de los componentes de las diferentes formulaciones en la cavidad tubular

| Componentes               | Variante 1 | Variante 2 | Variante 3 | Variante 4 | Variante 5 |
|---------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                           | [%]        | [%]        | [%]        | [%]        | [%]        |
| Polvo de Fe               | -          | 100        | 98,5       | 85,5       | 99,0       |
| Polvo de MnO <sub>2</sub> | -          | -          | -          | 11,7       | -          |
| Polvo de CaC <sub>2</sub> | -          | -          | -          | -          | 1,0        |

Tabla 4  
Composición química del acero API-5L grado B

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

Tabla 5  
Prototipos de electrodos tubulares modificados en su primera capa de barniz

| Modificación | Prototipo de electrodo tubular |                                  | Primera capa de barniz |                                  |
|--------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------|----------------------------------|
|              | Variante                       | Cavidad tubular                  | Mezcla                 | Formulación                      |
| I            | 2                              | Fe en polvo                      | (a)                    | Al + MnO <sub>2</sub>            |
| II           | 4                              | Fe polvo + Al + MnO <sub>2</sub> | (a)                    | Al + MnO <sub>2</sub>            |
| III          |                                | Fe polvo + Al + MnO <sub>2</sub> | (b)                    | Fe polvo + Al + MnO <sub>2</sub> |

soldadura, incluyendo en el ensayo al electrodo 6013 usado como patrón.

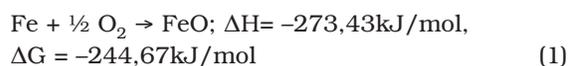
### 3. Resultados y Discusión

#### 3.1. Evaluación de formulaciones en la cavidad tubular

Con los electrodos fabricados, con cada una de las formulaciones obtenidas, se realizaron en el acuario los correspondientes depósitos de soldadura (Figura 3). Los resultados obtenidos se pueden resumir como se expresan a continuación.

En la **1ra variante (polvo de Fe)** fue necesario elevar la corriente hasta 130 A para lograr abrir el arco debido a que se deriva cierta cantidad de corriente por dentro de la cavidad, pero esta energía no es suficiente para alcanzar de forma estable la entalpía de ionización del Fe, la cual es relativamente alta (762,5 kJ/mol) y los elementos de baja entalpía de ionización en el revestimiento no lograron estabilizar el arco de forma continua. Sin embargo esta energía si es más que suficiente para fundir con mayor intensidad y velocidad el polvo de Fe que el tubo metálico (entalpía de fusión del Fe:  $\Delta H_f=13,8\text{kJ/mol}$ ), lo que provoca que los intersticios entre los granos de Fe se unieran formando cavidades mayores que pudieran dificultar el flujo continuo de metal fundido observándose un cordón bastante irregular con interrupciones del arco. Hay que destacar que el polvo de Fe (< 0,1 mm) es más reactivo que el Fe en forma maciza (alambre tubular). Esto se debe a que el polvo de Fe empleado presenta una superficie específica de 600 cm<sup>2</sup>/g, es decir 780 veces mayor que la correspondiente a la misma cantidad de alambre tubular, por lo que tal propiedad sugiere, también, una diferencia-

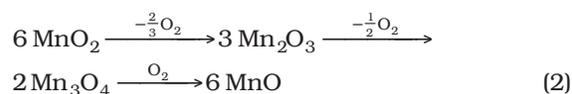
ción zonal en la oxidación de Fe de acuerdo a la reacción 2.



Todo esto provoca, de forma conjugada, que la profundidad del cono en la punta del electrodo sea mayor de lo normal, contribuyendo, adicionalmente, este efecto a cierta inestabilidad del arco durante el proceso.

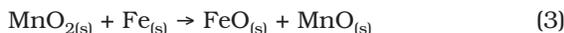
En la **2da variante (Fe + Al + MnO<sub>2</sub>)** se presentó al principio ciertas dificultades en establecer el arco, debido a interrupciones causadas también por la profundidad del cono en la punta del electrodo. En general el proceso de soldadura fue más estable que los anteriores casos, obteniéndose cordones con una forma más regular y continua y con mejor aspecto. Al valorar los fenómenos pirometalúrgicos que intervinieron en el proceso, se consideran que son diferentes a los mencionados en los casos anteriores, aunque algunos efectos pudieran semejarse a las dos variantes anteriores.

El óxido suministrador de oxígeno se descompone en el estado sólido de forma escalonada, al incrementarse la temperatura, lo que provoca una emisión casi continua de oxígeno dentro de la cavidad tubular:



Debido a la mayor presencia de polvo de Fe las etapas intermedias de la reacción de descomposición del MnO<sub>2</sub> son catalizadas, ocurriendo estas a mayores velocidades y quizás a menor temperatura. También sucede que el oxígeno,

producido por la descomposición del óxido metálico, reacciona exotéricamente con los polvos de Fe (y posiblemente con el tubo metálico) y de Al, consumiendo parte del primero y totalmente el segundo aportando energía al sistema de la forma siguiente:



Estas reacciones exotérmicas involucraron de una forma más directa a los componentes del revestimiento, en la parte externa del cono, a que participaran con mayor intensidad, provocando que la cavidad del cono fuese algo menor que en las variantes anteriores.

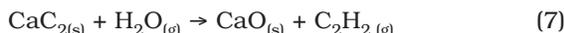
Como el polvo de Fe se encuentra en exceso, pero relativamente mucho menor a las variante 2da y 3ra, respecto al contenido de  $\text{MnO}_2$ , una parte del MnO formado en el interior de la cavidad tubular es reducido a altas temperatura por  $\text{Fe}_{liq}$  de la gota y en la zona central del baño de soldadura, pero al alejarse de ésta este proceso se invierte manifestándose con menor velocidad, lo que conduce a restituir en cierta medida el contenido Mn oxidado por el oxígeno en el cordón de soldadura acorde a las siguientes reacciones:



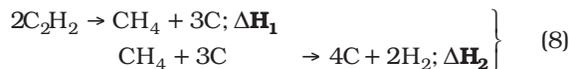
Y el resto del Mn en forma de  $\text{MnO}_{(s)}$  interactúa con la escoria líquida formada por el revestimiento y los productos de las reacciones incrementando levemente su fluidez, lo que no atenúa que se granule por choque térmico con el agua como las demás.

En la **3ra variante (Fe+CaC<sub>2</sub>)** ocurren fenómenos distintos a todos los antes mencionados, que provocan parecidos efectos de inestabilidad del arco a causa de la magnitud de la profundidad del cono en la punta del electrodo, a pesar del poco contenido de  $\text{CaC}_2$  en la cavidad tubular.

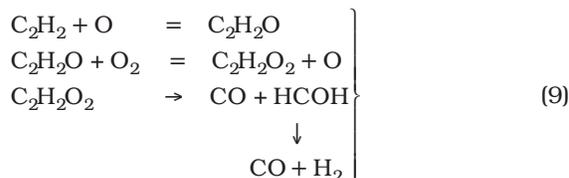
Una parte de carburo de calcio reacciona con los vapores de agua produciendo acetileno



Por lo general, los compuestos del tipo C-H son inestables a altas temperaturas y se descomponen. La descomposición del acetileno se puede representar esquemáticamente de la siguiente forma:



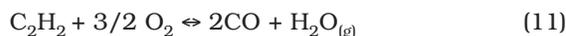
Durante este proceso de descomposición se libera energía,  $1/2(\Delta\mathbf{H}_1 + \Delta\mathbf{H}_2) = 224,6\text{kJ/mol}$ . En presencia de oxígeno, junto a la descomposición, se produce una oxidación por etapas (combustión):



El balance general del proceso descomposición-oxidación puede resumirse mediante la fórmula general siguiente:



En exceso de oxígeno, la reacción conduce a la formación de vapor de agua acorde a la siguiente reacción:

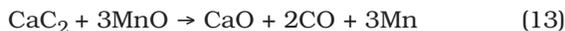


Ambas reacciones presentan un mayor número de moles en los productos de la reacción respecto a los reactantes, por lo que para su establecimiento tiene que vencer la presión hidrostática presente para efectuarse espontáneamente ( $\Delta G < 0$ ).

Mientras el polvo de Fe reacciona con una parte del oxígeno provocando un efecto similar a la 1ra variante, pero con el inconveniente que la presencia de  $\text{CaC}_{2(s)}$  y su alta temperatura de fusión, así como los productos de su interacción con el agua, provocan una mala conducción de la electricidad produciendo cierto nivel de inestabilidad del arco. También el calor que genera la combustión del acetileno contribuye a que cerca de la punta del electrodo el  $\text{Fe}_{(s)}$  se funda difundiendo, en la cavidad del alambre tubular por dentro de hacia los intersticios (los vacíos) entre

los diferentes granos y aquellos, dejados por la interacción del  $\text{CaC}_{2(s)}$  con el agua, interrumpiendo así el flujo eléctrico.

Es probable que ocurran, también, a altas temperaturas reacciones parciales con el  $\text{CaC}_{2(s)}$  del tipo siguiente:



Las reacciones anteriores han sido empleadas por la industria siderúrgica en procesos de desoxidación de acero, aunque no son ampliamente difundidas.

En la Figura 4 se muestra una representación de los electrodos tubulares revestidos y barnizados, así como el aspecto de la cavidad tubular después de ser sometidos a la soldadura subacuática mojada.

La evaluación preliminar de los diferentes prototipos electrodos tubulares revestidos en condiciones de soldadura subacuática mojada, permitieron definir posibles caminos a seguir para lograr el adecuado funcionamiento de los electrodos tubulares desarrollados y seleccionar las variantes más prometedoras desde el punto de vista metalúrgico. Básicamente en todas las variantes evaluadas se pudo observar que la reactividad del interior del alambre tubular del electrodo fue superior a la del revestimiento, lo cual ocasionó que la profundidad del cono fuera mayor a la normal, lo que interrumpía el arco continuamente (Figura 4). Este fenómeno puede ser resuelto de diferentes maneras, entre las cuales se pueden señalar:

- Disminución del espesor del revestimiento.
- Aumento de la reactividad del revestimiento.
- Incorporación de elementos reactivos dentro del barniz impermeabilizante.

### 3.2. Modificaciones al barniz impermeabilizante

Al realizar la operación de impermeabilización con el barniz modificado con las mezclas pirometalúrgicas (mezclas a y b) se observó que la cantidad de mezcla reactiva adicionada es función de la masa del revestimiento del electrodo y

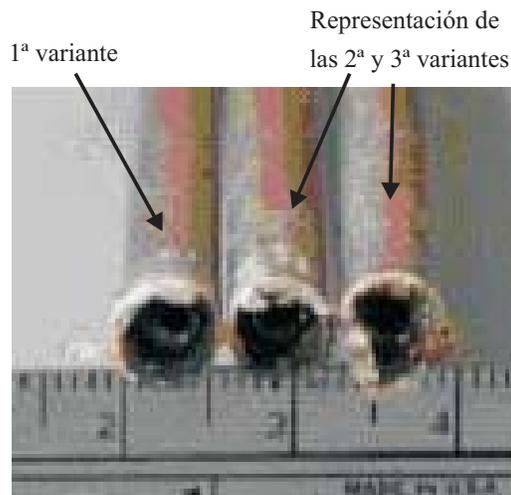


Figura 4. Electrodo tubular con revestimiento 6013 por dentro y por fuera (1ra variante) y representantes del resto de las variantes, donde se pueden apreciar los conos en la punta de los electrodos.

puede influir, en cierta medida, en la composición química del depósito de soldadura. Esta combinación de capas (activa-impermeabilizante) permite incrementar la actividad metalúrgica de la parte exterior del electrodo sin afectar el grado de impermeabilización.

Durante el proceso de soldadura con los electrodos modificados, en lámina de agua, se observó que con las variantes ensayadas se logró mejorar considerablemente el comportamiento tecnológico durante el proceso de soldadura, lográndose la obtención de cordones completos de soldadura. Esto puede ser apreciado en la Figura 5. En los experimentos realizados con los electrodos modificados se pudo comprobar que el cono formado en la punta del electrodo se redujo, como valor promedio, en un 35% con relación a los electrodos probados sin la modificación en el barniz.

Al comparar los resultados de los ensayos realizados con los electrodos impermeabilizados con los barnices modificados con las mezclas (a) y (b) se pudo comprobar que no existieron diferencias apreciables en cuanto a su comportamiento tecnológico, aunque si debe señalarse que la mezcla (b) es más difícil de aplicar sobre el electrodo y su adherencia es menor debido a que para obtener una cantidad de  $\approx 0,7\text{g}$  de mezcla pirometalúrgica ( $\text{Al} + \text{MnO}_2$ ) por electrodo, obliga a

aumentar el volumen relativo de mezcla (b) dentro del impermeabilizante debido a presentar una menor densidad.

#### 4. Conclusiones

A partir de las observaciones realizadas, se puede concluir que:

1. El grado de empaquetamiento alcanzado en las mezclas de polvo ( $\leq 60\%$ ) empleadas dentro de la cavidad tubular de los electrodos y sus características pirometalúrgicas influyen decisivamente en el comportamiento metalúrgico y tecnológico del proceso de soldadura subacuática mojada,
2. La adición de mezclas pirometalúrgicas al barniz impermeabilizante comercial contribuye de forma decisiva al comportamiento tecnológico de los electrodos tubulares revestidos debido a que reduce en un 35% la altura del cono en la punta del electrodo y da una contribución adicional de energía exterior que favorece el consumo del revestimiento de los electrodos tubulares revestidos.
3. Los electrodos tubulares revestidos y cubiertos con barniz modificado con mezclas pirometalúrgicas mostraron mejor comportamiento tecnológico que los electrodos macizos revestidos 6013 en una capa de agua de 1m.

#### 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 los resultados presentados.

#### Referencias Bibliográficas

1. Herold, H. and Protsb, F.: "Kompendium der Schweissmetallurgie". DVS-Verlag GMBH, Dusseldorf (2002), 13-19.
2. Marques, P. V; Modenesi, P. J. y Bracarense, A.Q.: "Soldagen: Fundamentos e Tecnologia". Editora UFMG, Belo Horizonte (2007), 18-27.
3. Sanchez-Osori, J., et al.: Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 117 (3), (1995), 212-220.

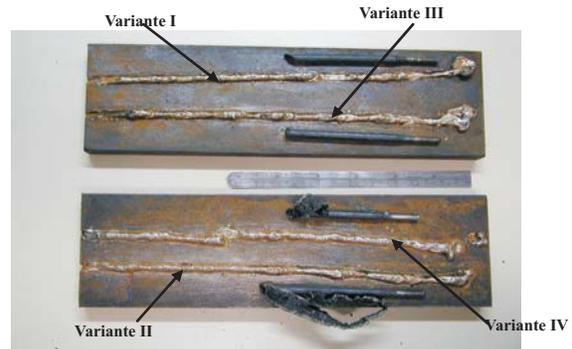


Figura 5. Depósitos realizados en el acuario con los electrodos tubulares revestidos modificados (I, II, III) y macizo 6013 (IV) cubiertos con barnices conteniendo mezclas pirometalúrgicas (a) y (b).

4. Rowe, M.D.: Hydrogen content of underwater wet welds deposited by rutile and oxidizing electrodes. Proc. Conf. OMAE'99, American Society of Mechanical Engineers. (1999), paper MAT-2231.
5. Pope, A.M.: Development of SMAW coatings for underwater wet at specific depth ranges. Proc. Conf. OMAE'96. American Society of mechanical Engineers. Vol. 3 (1996), 85-92.
6. Pessoa, E.C.P; Bracarense, A. Q.; Liu, S. Exothermic additions in a tubular covered electrode and oxidizing reactions influence on underwater welding. 26<sup>th</sup> International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, San Diego, California, USA (2007)1-10.
7. Reid, H.F. Información técnica sobre electrodos para soldar. Bulletin No. 1201A, desarrollado por Teledyne McKay, York, Pennsylvania; citado por Pessoa, E.C.P. en "Estudo da variação da porosidade ao longo do cordão em solda subaquáticas molhadas", Tesis Doctoral, Belo Horizonte, Escola de Engenharia da UFMG, 2007, 153pp.
8. Rodríguez-Pérez. M. Eléctrodo tubular revestido para el relleno superficial de centralizadores estabilizadores y piezas que trabaja en condiciones similares de trabajo. Tesis doctoral. Universidad Central de Las Villa. Enero 2002.

Recibido el 22 de Abril de 2008

En forma revisada el 17 de Junio de 2009