

MEJORAS EN PARÁMETROS DE SOLDADURA PARA UN NUEVO DISEÑO DE JUNTAS TUBO-TAPÓN DE ZIRCALOY-4

R. L. Martínez¹, L. Fernández², H. L. Corso², J. Ausas¹, J. R. Santisteban²

¹NVAP S.E., Bariloche, Argentina

²Centro Atómico Bariloche, CNEA, Bariloche, Argentina
corso@cab.cnea.gov.ar

RESUMEN

En este trabajo se presentan resultados experimentales de caracterización de soldaduras utilizando un nuevo diseño para las juntas de tubo-tapón de Zircaloy-4, aplicables a la fabricación de elementos combustibles para la Central Nuclear Atucha I. Se han elaborado probetas según el nuevo diseño de junta y se efectuaron las soldaduras mediante un equipo de soldadura orbital. Se llevaron a cabo mediciones de contenido de hidrógeno en las diferentes zonas de las soldaduras, ensayos de corrosión y de caracterización mecánica y microestructural, obteniéndose valores que satisfacen lo establecido por las normas de fabricación vigentes. En un trabajo anterior se reportó que muestras de prueba soldadas en un equipo con cámara más pequeña mostraban algunos valores de niveles de hidrógeno relativamente altos, presentando además en los ensayos de corrosión alteraciones en la zona soldada. Dados esos resultados, se decidió realizar nuevos ensayos tendientes a optimizar los parámetros de soldadura, extremando los cuidados en la pureza de la atmósfera de soldadura y en el manipuleo de las muestras. Además, se incrementó ligeramente la intensidad de corriente de soldadura a los efectos de conseguir una mejor penetración de material, sin incrementar significativamente el heat-input. Con estas modificaciones se ha logrado mejorar los valores de resistencia a la tracción, reducir los contenidos de hidrógeno muy por debajo del máximo permitido por normas (25 ppm) en todas las zonas de las soldaduras y obtener resultados satisfactorios en los ensayos de corrosión.

Palabras claves: Zircaloy, soldadura, combustible nuclear.

ABSTRACT

In this paper experimental results of characterization of welds using a new design for the pipe-joints of Zircaloy-4 applicable to the fabrication of fuel elements for Atucha I Nuclear Center are presented. Tests tubes have been prepared under the new joint design and the welds were made using orbital welding equipment. Measurements of hydrogen content were conducted in the different zones of the welds, corrosion testing and mechanical and microstructural characterization, obtaining values that satisfy the established by the current manufacturing standards. In a previous study it was reported that welded test samples in smaller camera equipment showed some values of relatively high levels of hydrogen, it also presented in the corrosion tests changes in the welded zone. Given those results, new tests aimed at optimizing the welding parameters were decided to conduct, taking extreme care in the purity of the welding atmosphere and the handling of samples. In addition, the intensity of welding current was slightly increased with the purpose of achieving a better penetration of the material, without significantly increasing the heat-input. With these changes the resistant values to traction, to reduce the hydrogen contents well below the maximum allowed by regulations (25 ppm) in all areas of the welds and to succeed in the corrosion tests have been improved.

Keywords: Zircaloy, welding, nuclear fuel.

1. INTRODUCCIÓN

En los elementos combustibles para las centrales nucleares de Argentina se utiliza para la unión tubo-tapón un sistema de soldadura GTAW (Gas Tungsten Arc Welding). La soldadura se realiza en el interior de una cámara que es evacuada y en la que luego se introduce argón, controlándose los contenidos de oxígeno y vapor de agua. La barra combustible gira, mientras el electrodo de tungsteno permanece estacionario. Como ya se mencionó en una publicación anterior [1], uno de los parámetros básicos empleado para evaluar la eficiencia de un proceso de soldadura es el calor aportado por unidad de longitud o "Heat Input" [2], que representa la energía entregada por unidad de longitud de

cordón de soldadura. En general, cuanto menor sea el "heat input" para una soldadura dada, menor será la afectación térmica del material, con lo que puede esperarse una mejor estructura metalúrgica, que se manifiesta con la obtención de un grano más fino, una disminución de los efectos producidos por distorsión y por tensiones residuales y finalmente, menor contaminación producida por absorción de hidrógeno. Con esta finalidad, se diseñó una nueva geometría para la unión tubo-tapón, con la intención de producir una soldadura de calidad, reduciendo el aporte térmico. En la figura 1 se muestran esquemáticamente el diseño actualmente en uso para los elementos combustibles tipo Atucha I, y el diseño de junta propuesto en este trabajo y utilizado para los ensayos de caracterización.

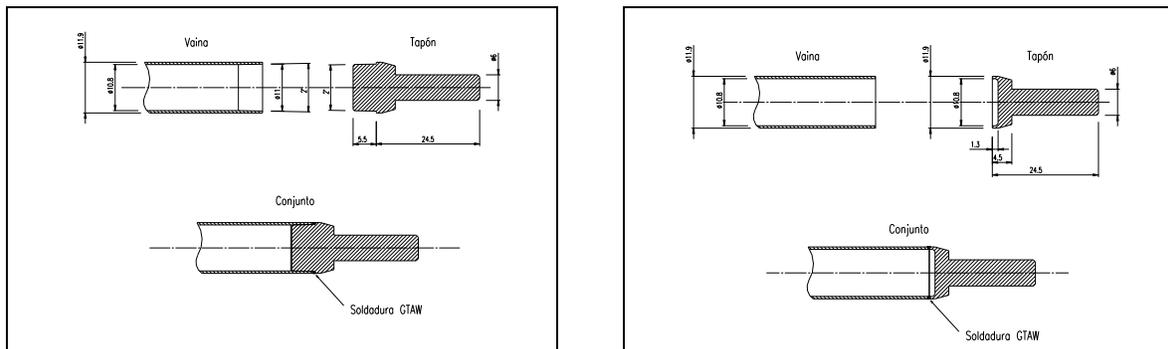


Figura 1. Diseño actual (izquierda) y diseño propuesto (derecha) para la junta tubo-tapón.

Para la realización de las probetas soldadas con el diseño de junta propuesto se ha utilizado un sistema de soldadura orbital. A diferencia del sistema que se emplea actualmente, en el equipo orbital se mantienen fijas las piezas a soldar, mientras que el cabezal de soldadura rota alrededor de las mismas. En este sistema, la atmósfera de soldadura se produce también en el interior de una cámara pero por efecto de purgado, es decir desplazando el aire de la misma, mediante la introducción de un caudal de gas inerte.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para preparar las probetas soldadas con el diseño propuesto, se elaboraron tapones por

torneado, utilizando barra de Zircaloy-4 suministrada por CONUAR-FAE S.A.

Las muestras de tubo y tapón fueron soldadas en INVAP S.E. Argentina por medio de una sola pasada GTAW con un equipo Arc Machines Inc. (AMI) de cabezal orbital. El equipo consta de una fuente de potencia de 200 A controlada por microprocesador Modelo 227, y se utilizó un cabezal 9-3500, de 1", con bujes adaptadores para permitir sujetar el tubo de zircaloy de pequeño diámetro. En la figura 2 se puede observar el equipo de soldadura en operación, mientras que la figura 3 muestra el detalle del posicionamiento de las piezas a soldar y el electrodo de tungsteno. La figura 4 muestra la fuente y el panel de control.



Figura 2. Equipo de soldadura orbital.



Figura 3. Piezas a soldar y electrodo.



Figura 4. Fuente de soldadura computarizada y panel de control.

En la tabla 1 se comparan los parámetros básicos empleados en el trabajo anterior [1] y en el presente trabajo, y los valores resultantes de heat input promedio en cada caso, calculados a lo largo del perímetro de la unión soldada. Se los compara con los

valores actualmente aplicados en el proceso industrial. En dicha tabla se aprecia que en los dos casos de aplicación del proceso orbital, el Heat Input resulta menor que el del proceso convencional.

Tabla 1. Comparación de parámetros de soldadura en los distintos procesos.

Parámetro	Parámetros del proceso actual	INVAP-CAB Cabezal 1" Ref. [1]	INVAP-CAB Cabezal 1" (Este trabajo)
Corriente I (A)	60	13	16
Tensión V (V)	9	11	11
Tiempo t (s)	15	52,5	21,8
Diámetro D (mm)	12	12	12
Heat Input $I \times V \times t / \pi D$ (Joule/mm)	215	199	102

Las probetas soldadas fueron destinadas a caracterización mecánica (ensayos de tracción), revelado de la macro-estructura, ensayos de corrosión, y determinación del contenido de hidrógeno.

Para la determinación del contenido de hidrógeno se realizaron los cortes necesarios para extraer muestras de las diferentes zonas próximas a la zona de fusión. Así, se midió el contenido total de hidrógeno en la zona fundida, la zona afectada por la temperatura del lado de la vaina, la zona afectada por la temperatura del lado del tapón, y en el material base, lejos de la soldadura.

Las mediciones de contenido de hidrógeno en las diferentes regiones de las soldaduras se llevaron a cabo en un sistema determinador de hidrógeno LECO RH-404, que funde la muestra y arrastra los gases liberados mediante una corriente de argón de alta pureza; el contenido de hidrógeno se determina por comparación de la conductividad térmica del gas con una corriente de gas argón puro.

Los ensayos de corrosión se hicieron en autoclave, en fase vapor de agua a $400\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $103\text{ bar} \pm 10\text{ bar}$ durante 72 horas, de acuerdo con la Norma ASTM G-2 [3] y el Procedimiento IT-CNEAMAT_ECO-01. Rev.3, evaluándose los resultados por inspección visual del estado superficial y características del tipo de óxido formado.

Las imágenes amplificadas, destinadas a apreciar la variación de tamaño de grano y la penetración de la soldadura, se realizaron por microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido.

Los ensayos de tracción de las probetas soldadas tapón-tubo se llevaron a cabo en una máquina INSTRON 5567, utilizando las mordazas del equipo y un alma de relleno del lado del tubo, para poder sujetarlo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 2 se vuelcan los resultados promedio de las mediciones de contenido total de hidrógeno en las diferentes zonas de las probetas. Para analizar las distintas zonas de las soldaduras, se han extraído muestras del cordón fundido (CF), la zona afectada por la temperatura del lado del tubo o vaina (ZAV), y la zona afectada por la temperatura del lado del tapón (ZAT). Con fines comparativos, también se midió el contenido de hidrógeno en el material base (MB), lejos de la soldadura, tanto en el tubo como en el tapón. Como se puede observar, los valores medidos de contenido de hidrógeno en todas las zonas de las soldaduras están bien por debajo del máximo admitido por normas ASTM para zircaloy de uso nuclear, que es de 25 ppm.

Tabla 2. Contenidos de hidrógeno en las diferentes zonas.

Probeta Nº	Contenido de Hidrógeno (wt ppm)				
	MB (tubo)	MB (tapón)	CF	ZAV	ZAT
12	12,8	2,12	15,5	13,5	2,87
13	6,75	2,22	15,5	11,8	4,28
14	6,78	3,10	12,9	10,9	2,74
15	6,08	2,67	9,34	8,13	2,07

Las macrografías y las imágenes SEM de las probetas soldadas permitieron verificar en todos los casos un correcto sellado y unión de las piezas soldadas, como se muestra en la figura 5. Adicionalmente, estas

macrografías mostraron que la región en la que se puede apreciar alteración de la microestructura del material es más pequeña en el caso de las soldaduras realizadas con el diseño propuesto en este trabajo.

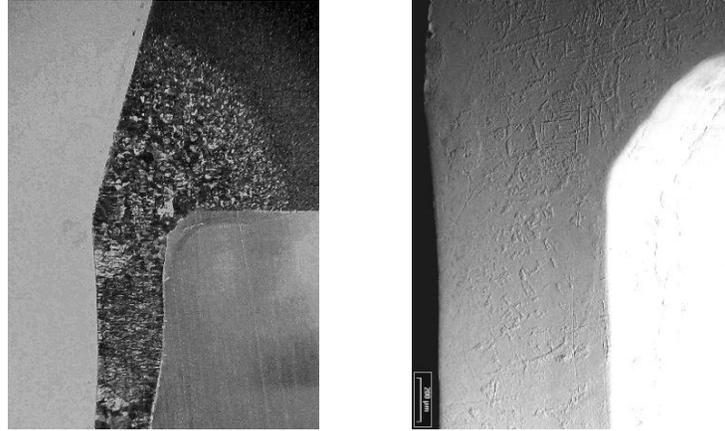


Figura 5. Macrografía e imagen SEM de una probeta soldada.

La figura 6 muestra probetas ensayadas a la tracción, donde se observa que la rotura se

produce del lado de la vaina.



Figura 6: Probetas ensayadas a la tracción.

La figura 7 muestra los resultados de uno de los ensayos de tracción, en base a los cuales se calculan las tensiones máximas de rotura,

para las que se obtuvieron valores entre 590 y 615 MPa.

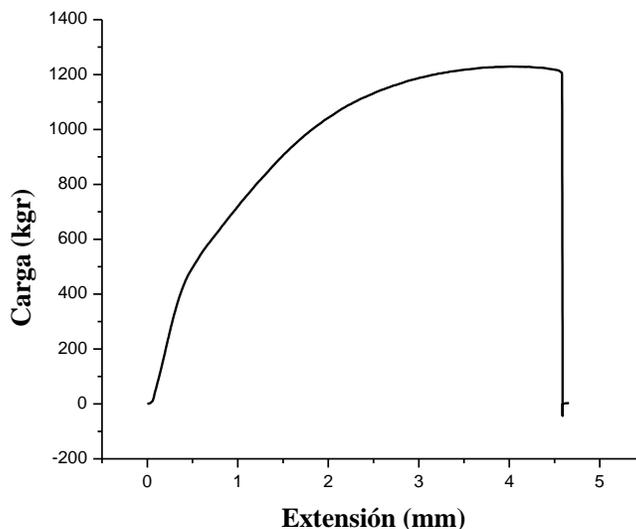


Figura 7. Curva de ensayo de tracción.

Se han obtenido tensiones máximas de rotura superiores al mínimo de 480 MPa y la rotura se ha producido en la vaina, en un todo de acuerdo con la especificación CNEA E.0.15.207, aplicable para los ensayos de tracción de la soldadura de tapón en vaina de Zry-4 tipo Atucha I.

La tabla 3 muestra los resultados de los ensayos de corrosión en dos probetas soldadas. En ningún sector de las muestras se observaron manchas de óxido blanco. Los registros de temperatura y presión indican que durante 3 días se mantuvieron las condiciones de temperatura: $400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ y

presión: $103 \text{ bar} \pm 10 \text{ bar}$ establecidas en la IT-CNEAMAT_ECO-01. Rev.3 para este tipo de ensayo.

La inspección visual del óxido formado sobre la soldadura y la zona afectada térmicamente cumple con los requerimientos establecidos en la IT-CNEAMAT_ECO-01. Rev.3.

Para ambas muestras, el óxido crecido sobre las vainas de Zircaloy-4 es negro, mate y uniforme y resulta semejante al observado sobre vainas Testigo tipo Atucha ensayadas en condición "as received" durante 3 días a $400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ y $103 \text{ bar} \pm 10 \text{ bar}$.

Tabla 3. Resultados de los ensayos de corrosión en probetas soldadas.

MUESTRA	INSPECCIÓN VISUAL	
	Soldadura	Zona afectada térmicamente
6	Óxido negro lustroso y uniforme	Óxido negro mate y uniforme
8	Óxido negro lustroso y uniforme	Óxido negro mate y uniforme

4. CONCLUSIONES

Se ajustaron los parámetros de soldadura para el nuevo diseño de junta tapón-vaina para elementos combustibles nucleares, para permitir un ciclo de soldadura con menor aporte térmico.

Los ensayos de tracción satisfacen la especificación que debe cumplir el fabricante de los elementos combustibles para la central Atucha I.

Las mediciones del contenido de hidrógeno en las distintas regiones de las probetas muestran en general una tendencia al aumento de concentración en la zona afectada por la temperatura, del lado de la vaina, y en la zona fundida. La zona afectada por la temperatura del lado del tapón se mantiene con valores muy bajos de concentración de hidrógeno. En todos los casos, los valores obtenidos no han superado el 54% del máximo permitido.

Los ensayos de corrosión de las muestras soldadas han resultado satisfactorios, de acuerdo con el procedimiento habitual para vainas de zircaloy tipo Atucha.

Los resultados obtenidos indican que el nuevo diseño de junta y el método de soldadura orbital podrían ser aplicados a nivel industrial en la línea de producción de elementos combustibles nucleares, pudiendo obtener soldaduras de buena calidad con menor aporte térmico, lo que se traduce en una menor afectación de la microestructura del material, y menor gasto energético. Adicionalmente, el nuevo diseño de junta

permitiría una reducción estimada en 42% en el consumo de Zircaloy-4 para tapones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo económico de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, así como la colaboración desinteresada de las empresas INVAP S.E. y CONUAR-FAE S.A.

Además, dejan constancia de la invaluable tarea del Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Unidad de Actividad Materiales de CNEA para la realización de los ensayos de corrosión, Pablo Riquelme y Raúl Stuke para los ensayos de tracción, Carlos Talauer en el maquinado de tubos y tapones, Carolina Ayala para las imágenes SEM, y Javier Villacura para corte y pulido de las probetas.

5. REFERENCIAS

- [1] Martínez, R. L., Corso, H. L., Ausas J., Fernández, L. Estudio sobre las perspectivas de aplicación de un nuevo diseño a la geometría de unión de juntas para las soldaduras de tubo-tapón de Zircaloy-4. Octavo Congreso de Metalurgia y Materiales CONAMET / SAM 2008, Santiago de Chile, 28-31 Octubre 2008.
- [2] Howard B. Cary, Modern Welding Technology. Prentice Hall, Second Edition, (1989).
- [3] ASTM G 2M-88, Standard Test Method for Corrosion Testing of Products of Zirconium, Hafnium, and their Alloys in Water at 633 K or in Steam at 673 K.