

INTRODUCCIÓN DEL ZIRLO™ COMO MATERIAL PARA COMPONENTES ESTRUCTURALES EN COMBUSTIBLE PWR

M. A. MONTES, R. PEREDA, S. J. KING

Las cada vez más severas condiciones de operación del combustible nuclear han hecho necesario el uso de aleaciones avanzadas para vainas combustibles como el Zirlo™ (*), que permiten obtener una respuesta claramente superior al Zircaloy-4 por la elevada resistencia a la corrosión que presenta así como por su mayor estabilidad dimensional. Esta superioridad de propiedades es extensible también a los componentes estructurales, donde dicha estabilidad dimensional juega un papel fundamental para mantener la insertabilidad de las barras de control.

En este artículo se presenta la experiencia operativa actual con Zirlo™ como material para componentes estructurales de elementos combustibles PWR, se indican las ventajas asociadas y se describen, por último, los programas de irradiación y verificación que las soportan.

INTRODUCCIÓN

Las condiciones en las que opera el combustible nuclear son cada vez más severas. Aspectos como el aumento en el quemado de descarga, mayores factores de pico, alargamiento de ciclos, altas concentraciones de Litio y altas temperaturas del refrigerante, implican que el comportamiento frente a la corrosión y el crecimiento inducido por irradiación sean los factores más limitantes para las vainas combustibles de Zircaloy-4 que hace cada vez más necesario el uso de aleaciones avanzadas como el Zirlo™ (*).

Las vainas de Zirlo™ presentan ventajas claras frente al Zircaloy-4 principalmente por su excelente resistencia a la corrosión en los escenarios más severos así como por su elevada estabilidad dimensional, derivada de un menor crecimiento y creep inducidos por irradiación, manteniendo sin cambios el resto de las propiedades físicas.

La superioridad en propiedades del Zirlo™ frente al Zircaloy-4 es también extensible a los componentes estructurales del elemento combustible (tubos guía y de instrumentación y rejillas), donde la estabilidad dimensional es crítica para mantener la insertabilidad de las barras de control y para minimizar la interacción entre rejillas.

El objeto de este artículo es presentar

la experiencia operativa actual del Zirlo™ como material para componentes estructurales en el combustible PWR, indicar las ventajas que presenta frente al Zircaloy-4 y detallar los programas de irradiación y de verificación en curso que soportan estas ventajas o que permitirán ratificar la información disponible hasta la fecha, respectivamente.

EXPERIENCIA OPERATIVA EN EL USO DEL ZIRLO™

El Zirlo™ es una aleación base Circonio que contiene una concentración del 1.0 % de Niobio, 1.0 % de Estaño y 0.1 % de Hierro. Fue desarrollada por Westinghouse a mediados de los años setenta (1), habiéndose llevado a cabo desde entonces numerosos programas de irradiación con elementos con vainas de Zirlo™ y habiéndose suministrado, también, recargas completas de combustible Zirlo™ (vainas, tubos guía y de instrumentación y rejillas), lo que da una idea de la amplia la experiencia (2, 3, 4, 5) con la que se cuenta a la fecha de hoy.

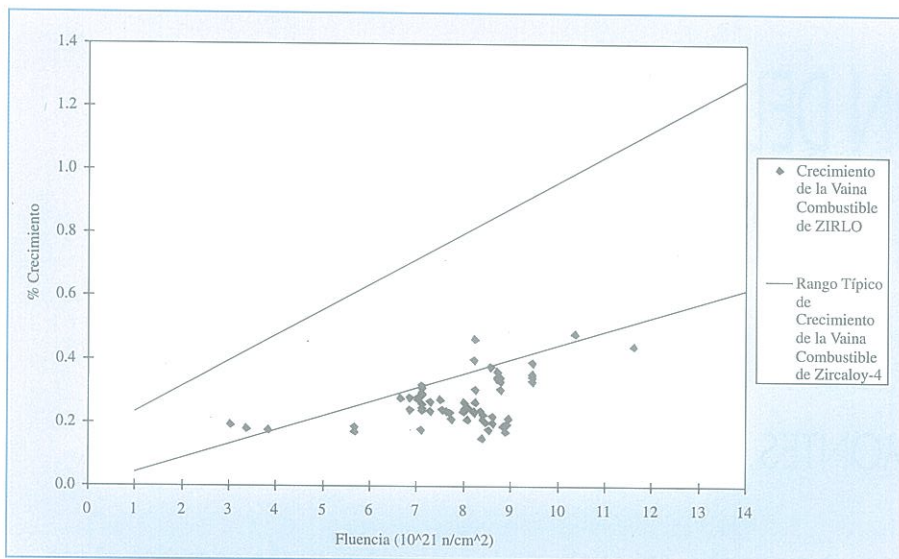
El Zirlo™ se ha irradiado en estos programas de demostración hasta tres ciclos de 18 meses en condiciones de alta temperatura y altas concentraciones de litio en el refrigerante, habiéndose alcanzado quemados medios de elemento de hasta 62 GWD/MTU en diferentes plantas PWR 17x17. También se han irradiado recargas completas suministradas con Zirlo™ hasta un total de 3 ciclos de 18 meses, en condiciones de operación similares a las antes descritas, habiéndose alcanzado quemados medios de región de 52 GWD/MTU, valor que va en aumento para el combustible que se encuentra actualmente en reactor.

El Zirlo™ como material de vaina se introduce en España en dos programas de demostración diferentes en las centrales de Almaraz II y Vandellós II en los años 1991 y 1994 respectivamente, habiendo operado con éxito sin problemas hasta quemados medios de elemento de 48 GWD/MTU a fecha de marzo de 1997. Dadas las ventajas del Zirlo™, se le puede considerar prácticamente ya el material estándar de vaina suministrado en

TABLA 1- Combustible entregado por Westinghouse utilizando Zirlo™ hasta el 31 de diciembre de 1997

COMPONENTE	NÚMERO DE CENTRALES NUCLEARES	NÚMERO DE CONJUNTOS COMBUSTIBLES	NÚMERO DE REGIONES
VAINA	32	3622	59
TUBO GUÍA	28	3279	53
REJILLAS	23	2443	38

(*) Zirlo™ es una marca registrada de Westinghouse Electric Company



F I- Crecimiento de la Vaina Combustible de ZIRLO

combustible PWR 17x17 para todas las centrales españolas.

Westinghouse comienza a introducir recargas de Zirlo™ en 1991. A medida que las plantas han hecho más severas las condiciones de operación, con mayores concentraciones de Litio, mayores temperaturas de refrigerante y ciclos más largos, el porcentaje de recargas suministradas con Zirlo™ frente a las suministradas con Zircaloy-4 ha ido en aumento. En la Tabla 1 se presenta la información correspondiente al combustible entregado por Westinghouse utilizando Zirlo™ hasta el 31 de Diciembre de 1997. En la Tabla 2 se incluyen las recargas comprometidas por Westinghouse con Zirlo™ desde el 1 de Enero de 1998.

A partir de estas tablas se puede observar que de los 3622 elementos suministrados hasta finales de 1997 que incorporan vainas de Zirlo™, aproximadamente el 90% incluyen tubos guía e instrumentación del mismo material, siendo el 67% aproximadamente los que introducen además rejillas intermedias de Zirlo™. Esta tendencia evoluciona notablemente en el año 1998 hasta hacer que, por un lado, el 100% de los 16.785 elementos suministrados con vainas de Zirlo™ monten, además, tubos guía y de instrumentación de este material e incrementar, por otro, el porcentaje relativo de elementos con rejillas intermedias de Zirlo™ a valores por encima del 91 %.

En el caso de las plantas españolas y europeas a las que ENUSA suministra combustible, dadas las cada vez más restrictivas condiciones de operación, la apuesta por el Zirlo™ como material de vaina y estructural se pone de manifiesto en las entregas realizadas y comprometidas tal como se describe en la Tabla 3, donde se observa una fuerte tendencia al alza, similar a la descrita en las dos tablas anteriores.

A la vista de estas tendencias es evidente que se están satisfaciendo adecuadamente las necesidades de las plantas con la introducción de combustible con Zirlo™.

VENTAJAS DEL ZIRLO™ COMO MATERIAL PARA COMPONENTES ESTRUCTURALES FRENTE AL ZIRCALOY-4

La elevada estabilidad dimensional del Zirlo™ comparada con el Zircaloy-4 es la razón por la que se emplea en com-

ponentes estructurales, permitiendo cumplir adecuadamente las necesidades de las plantas que operan con temperaturas más elevadas y mayores concentraciones de Litio en el refrigerante, así como ciclos cada vez más largos.

Las propiedades que confieren al Zirlo™ un comportamiento en reactor superior al Zircaloy-4 son un menor crecimiento inducido por irradiación, un menor creep bajo irradiación y una mayor resistencia a la corrosión, siendo las dos primeras esenciales para mitigar los fenómenos de inserción incompleta de barras de control y de interacción entre rejillas.

A continuación se describen cada una de estas propiedades:

• Crecimiento de los componentes estructurales de Zirlo™

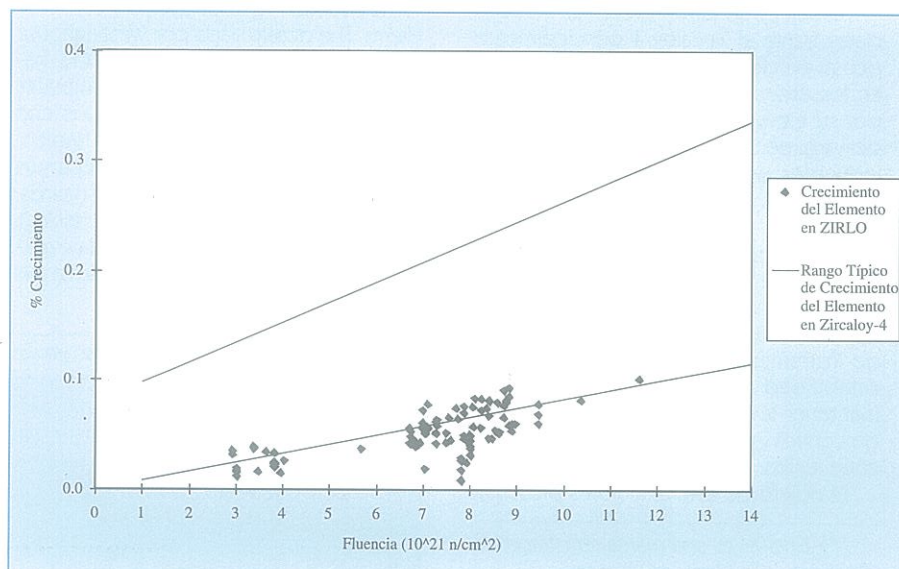
Para la fabricación de las vainas combustibles se utiliza material trabajado en frío y con alivio de tensiones (CWSRA), fundamentalmente por la mayor resistencia mecánica que proporciona. Por otra parte, el material recristalizado (RXA) encuentra su aplicación estructural por su bajo crecimiento en operación.

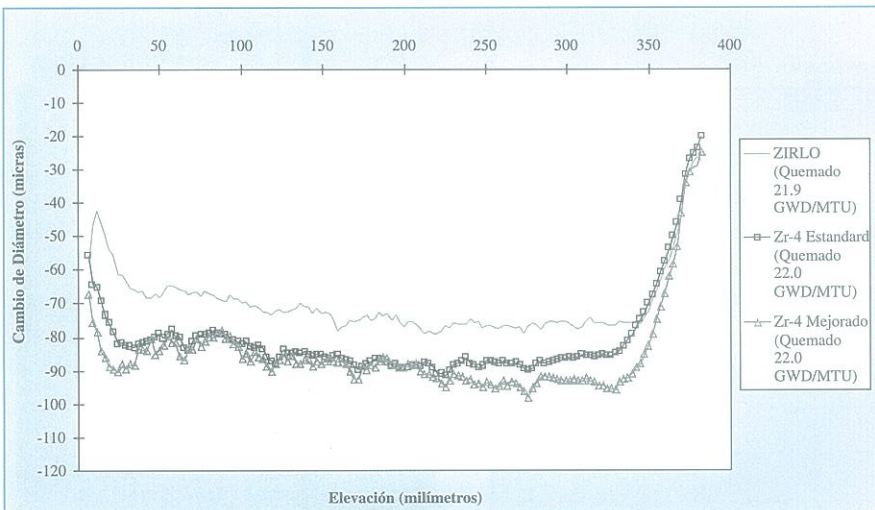
Como puede observarse en la Figura 1, el Zirlo™ trabajado en frío y con alivio de tensiones presenta un crecimiento del 50 % inferior al Zircaloy-4. En la Figura 2 se puede observar que el Zirlo™ recristalizado presenta una reducción en crecimiento todavía mayor.

TABLA 2- Compromiso de entregas de Westinghouse utilizando Zirlo™ a partir del 1 de enero de 1998

COMPONENTE	NÚMERO DE CENTRALES NUCLEARES	NÚMERO DE CONJUNTOS COMBUSTIBLES	NÚMERO DE REGIONES
VAINA	46	16785	242
TUBO GUÍA	46	16785	242
REJILLAS	41	15416	222

F II- Crecimiento del Elemento Combustible de ZIRLO





F III - PERFILOMETRÍA DE LAS VAINAS COMBUSTIBLES. Creep Medio - Barras del Primer Ciclo de Quemado

En ambas figuras se aprecia que el Zirlo™ presenta un menor crecimiento comparado con el Zircaloy-4 ya sea como material de vaina (CWSRA) o como material de tubo guía o de instrumentación y rejilla (RXA).

• *Creep de los componentes estructurales de Zirlo™*

El material recristalizado es empleado en componentes estructurales también por el menor creep térmico y bajo irradiación que presenta, en comparación con el material trabajado en frío y con alivio de tensiones.

Las medidas de creep de tubos guía de Zirlo™ no irradiados e irradiados en reactor han dado valores claramente menores a los del Zircaloy-4. En la Tabla 4 se incluyen los resultados de creep térmico obtenidos de ensayos uniaxiales y biaxiales sobre tubos guía de Zirlo™, donde se puede observar que el creep térmico es un 50 % inferior en Zirlo™ recristalizado que en Zircaloy-4 recristalizado.

Esta información de material no irradiado se soporta además por los datos obtenidos de material irradiado en reactor. Así, se puede observar a partir de datos procedentes de tubos guía y de tubos de instrumentación de elementos descargados con un quemado medio de 51 GWD/MTU, que el creep inducido por irradiación en Zirlo™ recristalizado, es el 50% menor que el del Zircaloy-4. Esta misma tendencia se observa para material de vainas trabajado en frío y con alivio de tensiones (Figura 3).

• *Comportamiento a corrosión de los componentes estructurales de Zirlo™*

El comportamiento a corrosión en los componentes estructurales de Zirlo™ se ha medido en elementos combustibles en los que se han alcanzado quemados medios de 50 GWD/MTU. En la Figura 4 se muestra un gráfico comparativo entre los diferentes espesores de corrosión medidos frente al valor de quemado. Se

puede observar que los espesores de corrosión en Zirlo™ se sitúan muy por debajo del Zircaloy-4. Los menores valores de corrosión suponen, además, que la hidruración en reactor sea también inferior para el Zirlo™.

PROGRAMAS SOPORTE Y DE VERIFICACIÓN PARA DEMOSTRAR EL SUPERIOR COMPORTAMIENTO DEL ZIRLO™

La experiencia en operación relativa al empleo de Zirlo™ como material estructural se puede resumir en los siguientes apartados:

• *Programas de irradiación en los que se ha caracterizado el comportamiento del Zirlo™ como material estructural*

Los Programas en los que se ha verificado el superior comportamiento del Zirlo™ frente al del Zircaloy-4 han sido los siguientes:

- Crecimiento de tubos guía de Zirlo™

con un quemado medio de elemento de hasta 62 GWD/MTU.

- Crecimiento de Tubos de Instrumentación de Zirlo™ con un quemado medio de elemento de hasta 51 GWD/MTU.

- Crecimiento de rejillas de Zirlo™ con un quemado medio de elemento de hasta 50 GWD/MTU.

- Creep en tubos guía de Zirlo™ con un quemado medio de elemento de hasta 51 GWD/MTU.

- Corrosión en Tubos Guía de Zirlo™ con un quemado medio de elemento de hasta 51 GWD/MTU.

- Corrosión en rejillas de Zirlo™ con un quemado medio de elemento de hasta 50 GWD/MTU.

• *Programas de irradiación en curso en los que se caracterizará el comportamiento del Zirlo™ como material estructural*

Los programas en los que se va a seguir caracterizando el buen comportamiento del Zirlo™ como material estructural son los siguientes

- Corrosión en tubos guía de Zirlo™ con un quemado medio de elemento de hasta 62 GWD/MTU

- Corrosión en rejillas de Zirlo™ con un quemado medio de elemento de hasta 58 GWD/MTU

- Caracterización de un esqueleto completo de Zirlo™ (tubos guía y rejillas) con un quemado medio de elemento de 50 GWD/MTU.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

Las cada vez más restrictivas condiciones de operación en reactor hacen necesario el uso de aleaciones optimizadas para poder satisfacer los requisitos de diseño con márgenes suficientes.

F IV - Espesor de Óxido versus Quemado Medio del Elemento Para Estructuras de ZIRLO Recristalizado y Zircaloy-4 Recristalizado

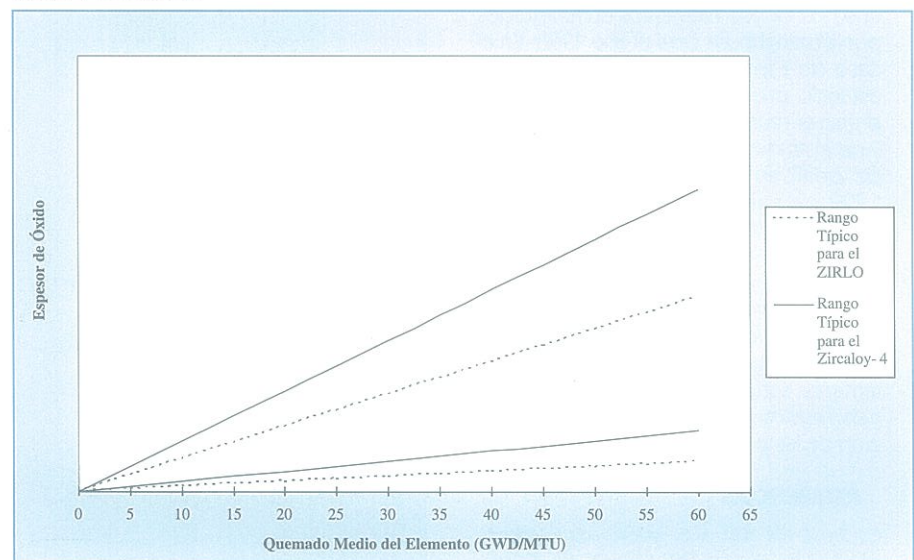


TABLA 3- Entregas realizadas (R)/comprometidas (C) por Enusa en España y en Europa utilizando Zirlo™

COMPONENTE	NÚMERO DE CENTRALES NUCLEARES		NÚMERO DE CONJUNTOS COMBUSTIBLES		NÚMERO DE REGIONES	
	(R)	(C)	(R)	(C)	(R)	(C)
VAINA	7	5	381	248	7	5
TUBO GUÍA	2	3	106	180	3	3
REJILLAS	1	2	2	124	1	2

TABLA 4- Creep térmico del Zirlo™ frente al del Zircaloy-4

MATERIAL	TENSIÓN (KSI)	TEMPERATURA (°F)	CREEP (%/100 h)
ZR4 RXA	15.6 (Biaxial)	725	0.06
Zirlo™ RXA	15.6 (Biaxial)	725	0.03
ZR4 RXA	25.0 (Uniaxial)	625	0.87
Zirlo™ RXA	25.0 (Uniaxial)	625	0.20

El Zirlo™ ha sido seleccionado como el material más adecuado para los componentes estructurales de los elementos combustible PWR por su menor crecimiento y menor creep inducidos por irradiación y su mejor comportamiento a corrosión que el Zircaloy-4. Estas propiedades proporcionan una estabilidad dimensional superior bajo irradiación y, por lo tanto, una respuesta altamente satisfactoria a los problemas actuales de inserción incompleta de barras de control o de interacción entre rejillas.

La superioridad en propiedades viene avalada por los programas de irradiación en los que se ha caracterizado el comportamiento de Zirlo™ como material estructural, habiendo en curso otros programas adicionales de verificación en los que estas diferencias en comportamiento entre el Zirlo™ y el Zircaloy-4 serán cuantificadas aún más.

El empleo del Zirlo™ como material estructural en combustible PWR sigue una tendencia claramente al alza, superando el 91 % de los elementos suministrados por Westinghouse para el año 1998. En el caso de España la tendencia es similar, estando prevista la entrega de las dos primeras recargas con vainas, tubos guía y de instrumentación y rejillas intermedias de Zirlo™ en el primer semestre del año 1999 para las centrales nucleares de Almaraz I y Asco II.

Se puede decir, en conclusión, que el empleo del Zirlo™ como material para los componentes estructurales de los elementos combustibles PWR permite y permitirá seguir dando una respuesta altamente satisfactoria ante las cada vez más restrictivas condiciones de operación de las plantas.

REFERENCIAS

(1) Sabol, G.R. Kilp, M.G. Balfour, and E. Roberts, "Development of a Cladding Alloy for High Burnup",

Zirconium in the Nuclear Industry: Eighth International Symposium, ASTM STP 1023, L.P.F. Van Swam and C.M. Eucken, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1989, pp. 227-244.

(2) Sabol, G. Schoenberger, and M.G. Balfour, "Improved PWR Fuel Cladding". IAEA-TECDOC-665, Proceedings of a Technical Committee Meeting held in Plzen, Czechoslovakia, May 14-17, 1991.

(3) Sabol, R.A. Weiner, K.R. McAtee, W.J. Leech, O.A. Correal-Pulver, R.N. Stanutz, R.J. Comstock, and R.S. Miller, "In-Reactor Corrosion Performance of the Zirlo™ Alloy and Zircaloy-4 and Related Corrosion Modeling", Presented at the 1994 International Topical Meeting on LWR Fuel Performance, April 17-21, 1994.

(4) Sabol, R.J. Comstock, R.A. Weiner, P. Larouere, and R.N. Stanutz, "In-Reactor Corrosion Performance of Zirlo™ and Zircaloy-4", Zirconium in the Nuclear Industry: Tenth International Symposium, ASTM STP 1245, A.M. Garde and E.R. Bradley Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994, pp. 724-744.



· Steven J. KING es Ingeniero Técnico Avanzado en la División Comercial de Combustible Nuclear de Westinghouse Electric Company, localizada a las afueras de Columbia, Carolina del Sur (USA). Tiene el título de Bachelor of Science en ingeniería mecánica y de Master of Science en metalurgia y cuenta con doce años de experiencia en diferentes áreas de diseño de materiales, siendo su responsabilidad presente la evaluación del comportamiento bajo irradiación en reactor y en celdas calientes de los componentes estructurales de Zirlo y Zircaloy-4.



· Miguel Ángel MONTES NAVARRO es Ingeniero Industrial, especialidad metalurgia. Ingresó en ENUSA en el año 1989. Presta sus servicios en la actualidad en el Grupo de Tecnología de Materiales y Suministros del Departamento de Ingeniería del Producto, en el que es responsable de la supervisión técnica de subcontratistas de componentes para la fabricación de elementos combustibles BWR. Participa, así mismo, como representante de Ingeniería en la cualificación de los procesos de unión por soldadura y de las inspecciones asociadas que tienen lugar en las instalaciones de ENUSA en Juzbado y de su seguimiento en producción.

(5) Sabol, R.J. Comstock, G. Schoenberger, H. Kunishi, and D.L. Nuhfer, "In-Reactor Fuel Cladding Corrosion Performance at Higher Burnups and Higher Coolant Temperatures". International Topical Meeting on Light Water Reactor Fuel Performance. Portland, Oregon, March 1997.



· Rosa María PEREDA REVUELTA es Ingeniero Industrial, especialidad metalurgia desde 1983. Ingresó en ENUSA en el año 1988 en Ingeniería del Producto y en la actualidad es responsable del Grupo de Tecnología de Materiales y Suministros. Las principales funciones de este grupo tecnológico son la generación de las especificaciones de materiales necesarias para la compra de los diferentes componentes y materias primas para ENUSA, la participación en la cualificación de los procesos de fabricación e inspección a ser usados por Enusa en la fabricación en Juzbado o en sus suministradores y la evaluación de datos sobre el comportamiento del combustible.