

# APLICACIÓN DE CORRIENTES INDUCIDAS A LOS ENSAYOS DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES IRRADIADOS

G. Domizzi<sup>1</sup>, M. Ruch<sup>2</sup>, G. Ruggirello<sup>3</sup>, C. Spinosa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>U. A. Materiales, <sup>2</sup>U. A. Ensayos no Destructivos y Estructurales, <sup>3</sup>U.A. Combustibles  
Centro Atómico Constituyentes, Comisión Nacional de Energía Atómica  
Av. del Libertador 8250 - (1429) - Buenos Aires - Argentina  
domizzi@cnea.edu.ar, ruch@cnea.edu.ar, ruggirel@cnea.edu.ar



AR9800025

Para conocer el comportamiento de los elementos combustibles de las Centrales Nucleares de Potencia, se efectúa sobre ellos una serie de ensayos posirradiación. Uno de los principales componentes de estos combustibles es su recubrimiento o vaina, elaborada en Zircalloy-4, que constituye la primera barrera de contención de los productos de fisión. Inicialmente, se debe identificar, en piletas de decaimiento, las barras falladas en los manojos combustibles sospechosos de contener fallas. Más tarde, en celdas calientes y previo a los ensayos destructivos, se requiere una caracterización de la defectología de la vaina. El método de corrientes inducidas se utiliza como herramienta complementaria, confiable y rápida, para encontrar y caracterizar los defectos que no son detectables en las inspecciones visuales, tales como pequeñas fisuras, poros y zonas anormalmente hidratadas. El proyecto completo de empleo de este método en los ensayos posirradiación involucra tres etapas: desarrollo y puesta a punto en laboratorio; ensayos in-situ en piletas y aplicación en celdas calientes, la primera de las cuales se describe en este trabajo.

Se desarrollaron técnicas para la preparación en laboratorio de patrones de defectos simulados: mecánicos, microfisuras, concentración de hidruros, ampollas de hidruros, óxidos, etc. Se construyó un dispositivo mecánico para el desplazamiento automático de las sondas. Se diseñaron sondas específicas para cada tipo de defecto y se puso a punto el procedimiento de ensayo correspondiente.

Postirradiation tests are performed on the fuel bundles of Nuclear Power Plants, in order to evaluate their performance. The Zircalloy-4 cladding, the first containment of the fission products, is a very important part of these bundles. A fundamental step of these tests is the in-pool identification of the failed bars in the "suspect" bundles. Later, once in the hot cell facility and prior to the destructive tests, it is necessary to characterize the defects in the cladding. The eddy current method provides a means for fast and reliable detection and characterisation of defects unobservable in visual inspection, such as tiny cracks, pores and anomalously hydrided regions. The project for the application of this method in postirradiation tests has been divided into three stages, namely laboratory set up, in-pool tests, hot-cell application, the first one being described here.

Techniques for the construction of synthetic defects (machined, micro cracks, abnormal hydride concentration, hydride blisters, oxide layers) were developed. A mechanical device for automatic probe movement was designed and constructed. Special external probes for the particular defects were developed. The inspection procedure was prepared.

## I. INTRODUCCIÓN

Las dos centrales nucleares de Argentina, Atucha I y Embalse, son del tipo de agua pesada presurizada (PHWR) y utilizan elementos combustibles (EC) formados por manojos de barras combustibles constituidas por vainas de Zircalloy-4 (Zry-4) que contienen a las pastillas de UO<sub>2</sub>. Es precisamente dicha vaina el material de interés en este trabajo. Las vainas de Atucha tienen un diámetro externo de 11,90 mm y espesor de pared de 0,55 mm y las de Embalse, 13,02 mm y 0,40 mm respectivamente.

En su estada en el reactor, los elementos combustibles (EC) y en especial las vainas sufren modificaciones. Cuando se los extrae, pasan a la piletta de decaimiento. Algunos de estos EC son sometidos a ensayos posirradiación (PIE), con el objetivo de conocer el estado final, evaluar su

comportamiento y correlacionarlo con los parámetros de fabricación de los EC y de operación del reactor.

Los PIE son laboriosos y costosos, y se hace imprescindible contar con un método rápido y confiable para seleccionar: en piletas de decaimiento las barras combustibles más "interesantes" para su análisis y en celdas calientes las zonas de estudio para ensayos destructivos. El método de corrientes inducidas es uno de los más característicos y tradicionales empleados con este fin <sup>1,2</sup>.

Entre los defectos que se espera encontrar podemos mencionar

- poros de muy pequeño diámetro (del orden de 100  $\mu\text{m}$ ),
- micro fisuras abiertas o cerradas
- desgastes externos por vibraciones,
- altas concentraciones o ampollas de hidruros debidas a gradientes térmicos y de tensión

Estos defectos pueden presentarse solos o combinados. En general, cualquiera de éstos ocupa un

volumen muy pequeño de la sección del tubo en la que se inducen corrientes. Para asegurar su detección por este método, se requiere condiciones de sensibilidad y amplificación muy específicas. Estas condiciones deben seleccionarse en forma experimental empleando "defectos simulados" cuyas dimensiones y propiedades sean similares a las "esperables". Una parte de este trabajo se refiere por lo tanto a la preparación de los mismos.

Como en la celda caliente y en las piletas de decaimiento se debe trabajar en forma remota, se diseñó y se construyó también para el laboratorio un dispositivo mecánico para el desplazamiento axial de las sondas, a velocidad controlable desde el panel.

Se utilizó sonda diferencial externa en modo puente, ya que sólo se puede acceder a la superficie externa de las vainas.

## II. TRABAJO EXPERIMENTAL

### Construcción de defectos simulados

Se preparó una serie de "defectos simulados" en vainas vírgenes de combustibles tipo Embalse, por dos métodos: mecanizado y tratamientos térmicos. En la Tabla 1 se presenta un listado de los defectos simulados construidos.

TABLA 1:  
Defectos simulados construidos y evaluados.

Defecto	Dimensión. [mm]	Profundidad
Agujero 1	0,3	No pasante
Agujero 2	0,4	Pasante
Agujero 3	0,4	Pasante
Agujero 4	0,5	Pasante
Agujero 5	0,3	Pasante+desgaste
Hidruro 1	3,0	Superficial ext.
Hidruro 1 pulido	3,0	Superficial ext.
Hidruro 2 + fisura	3,0	Superficial ext.
Mat. homogéneamente hidruado		Cambio de conductividad
Ranura int. 1	0,05 x 0,5	12,5 %
Ranura int. 2	0,10 x 0,5	25 %
Ranura int. 3	0,15 x 0,5	37,5 %
Ranura int. 4	0,20 x 0,5	50 %
Ranura int. 5	0,05 x 1,0	12,5 %
Ranura int. 6	0,10 x 1,0	25 %
Ranura int. 7	0,15 x 1,0	37,5 %
Ranura int. 8	0,20 x 1,0	50 %
Discontinuidad circunferencial	Abertura a tope	100 %

### Defectos mecanizados.

Se mecanizaron ranuras internas con herramientas de corte en un torno de precisión. Se elaboraron agujeros de pequeño diámetro con una electro-erosionadora, usando como electrodos alambres muy finos de aleación especial.

### Obtención de ampollas de hidruros

Mediante tratamiento térmico se obtuvieron pequeñas zonas de alta concentración de hidruro (ampollas simuladas).

Se emplearon secciones de vaina de 100 mm de longitud. En primer lugar se incrementó el contenido de hidrógeno hasta alcanzar una concentración del orden de 100 a 150  $\mu\text{g/g}$ . Para ello se cargó hidrógeno en forma electrolítica en medio ácido. De esta forma se obtiene una capa superficial de hidruro de circonio.

Para lograr una distribución uniforme de hidruros se realizó un tratamiento térmico, en vacío, a  $425 \pm 5^\circ\text{C}$  durante 5 horas.

La formación de la ampolla de hidruro se logró aplicando un gradiente térmico localizado. Para ello se empleó el dispositivo diseñado a tal fin<sup>3</sup>. La muestra se colocó en un horno eléctrico abierto, sobre un bloque de aluminio. En el interior de la vaina se introdujo una barra de cobre para uniformar la temperatura. En la zona media superior de la vaina se apoyó un dedo frío de aluminio de sección circular (5 mm de diámetro) con la curvatura de la vaina. El dedo frío se refrigera con agua termostatizada a  $20^\circ\text{C}$ ; la temperatura se midió en tres puntos: en la muestra debajo del dedo frío ( $T_1=419^\circ\text{C}$ ), en la muestra a 30 mm del dedo frío ( $T_2=430^\circ\text{C}$ ) y en la punta fría a 5mm de la muestra ( $T_3=60^\circ\text{C}$ ). El gradiente térmico se mantuvo durante 14 días, al cabo de los cuales la vaina se enfrió lentamente en horno.

Se elaboraron ampollas de distinta profundidad, que alcanzaron desde una fracción del espesor de la vaina (hidruro 1) hasta otras que atraviesan totalmente la pared de la misma (hidruro 2).

La figura 1 muestra una macrografía del hidruro 2, se observa un incremento de volumen, con forma de anillo; producido por la menor densidad del hidruro respecto del Zry-4. Este aspecto de anillo es propio de las etapas iniciales de formación de la ampolla<sup>3</sup>. Esta ampolla tiene, además, fisuras asociadas.

Una vez finalizados los ensayos de corrientes inducidas se seccionó la vaina según el plano radial - axial para observar metalográficamente el aspecto de la ampolla en distintas secciones. La figura 2 muestra un corte de la ampolla de hidruro 1 en la sección media.

También se observó que la distribución de hidruros en la zona que rodea la ampolla y en una extensión de  $\sim 3$  mm mantiene el tamaño de hidruros obtenido por el tratamiento térmico previo a la

formación de la ampolla, en tanto que en zonas apartadas (donde los hidruros iniciales fueron disueltos) se obtuvo una nueva distribución con hidruros más largos y separados.



Figura 1. Macrografía de la ampolla de hidruro 2 obtenida por gradiente térmico (- - - 100µm)

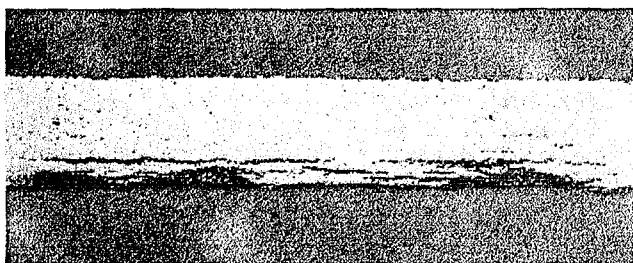


Figura 2. Sección media en el plano radial - axial del hidruro 1. (32x)

## Detección de defectos por corrientes inducidas

### Sondas diferenciales

Se diseñaron y construyeron varias sondas diferenciales circunferenciales externas. En todos los casos, los carretes y la separación entre ellos era del orden del espesor de pared de la vaina. Sólo diferían en el espesor de la pared del carretel, que determina el lift-off. Para esta primera etapa se usó la sonda con menor huelgo, aproximadamente 0,5 mm. El número de vueltas y el diámetro del alambre para una buena respuesta en el rango 150-1500 kHz se calcularon con un programa desarrollado en nuestro laboratorio. Los cuerpos de las sondas se maquinaron en nuestro taller y el bobinado se hizo con una bobinadora artesanal también construida en el laboratorio.

## Equipamiento

Se trabajó con un equipo de corrientes inducidas MAD4D de "Eddy Current Technology" (ect), basado en PC, de cuatro frecuencias independientes, y muy altas estabilidad y sensibilidad. Se repitió la serie de mediciones con un MIZ-22 de Zetec, en modo bifrecuencia, dado que se prevé usar este equipo para el trabajo en pileta.

## Consideraciones acerca de la selección de las frecuencias

Desde el punto de vista del ensayo por corrientes inducidas, las discontinuidades externas y/o pasantes como poros, agujeros, fisuras y ranuras deberían producir señales del tipo "faltante de material" o sea cambios en el espesor de la vaina y en su resistencia eléctrica ( $\delta t$  y  $\delta R$ ); el desgaste se manifiesta como una disminución en el factor de llenado ( $\delta \eta < 0$ ) o en el diámetro externo de la vaina ( $\delta b < 0$ ), y los hidruros generan un incremento en la conductividad eléctrica del material ( $\delta \sigma > 0$ )<sup>4,5</sup>. Por lo tanto, las frecuencias de ensayo debieron ser elegidas de modo que la sensibilidad a las variaciones enunciadas fuera alta.

Se estudió la respuesta a seis frecuencias de ensayo diferentes, cuatro menores que la  $f_{90}$ , que para este caso es de 1,35 MHz, y dos mayores que ella. Recordemos que  $f_{90}$  se define como la frecuencia para la cual la relación  $t/\delta$  entre el espesor de pared del tubo y la profundidad de penetración standard es 1.1 y el ángulo entre las señales de indicación externa e interna del 50% es  $90^\circ$ <sup>6</sup>.

Para seleccionar las frecuencias bajas, se siguió el análisis de Blitz<sup>7</sup>, que permite determinar las zonas del diagrama de impedancia con las características de sensibilidad buscadas.

Cabe recordar que en este análisis, se calculan las componentes real e imaginaria de la impedancia compleja de una bobina que rodea a un tubo conductor, normalizada respecto de la inductancia de la bobina en aire:  $R/\omega L_0$  y  $\omega L/\omega L_0$ , en función de una variable adimensional,  $\beta^2$ , igual a la  $f_0$  propuesta por Förster<sup>8</sup>. Luego se ubican esos valores en las curvas correspondientes, y se observa la sensibilidad a pequeñas variaciones de las propiedades geométricas o electromagnéticas de las muestras.

La variable adimensional  $f_0$  es

$$f_0 = \beta^2 = \omega \mu_r \mu_0 \sigma b^2 = f / f_g \quad (1)$$

donde  $f$  es la frecuencia de ensayo,  $\omega = 2 \pi f$ ,  $\mu_r$  y  $\mu_0$  son respectivamente la permeabilidad magnética relativa y la del aire,  $\sigma$  es la conductividad eléctrica y  $b$  el radio de la vaina. Por lo tanto,

$$f_g = 1 / 2 \pi \mu_r \mu_0 \sigma b^2 \quad (2)$$

Se calculó  $f_g$  para cuatro valores distintos de la conductividad eléctrica (conductividad eléctrica del Zircalloy-4, aproximadamente  $1,4 \cdot 10^6$  Siemens <sup>6</sup> y tres valores mayores que ésta, para simular concentraciones variables de hidruros de circonio en el metal <sup>4,5</sup>). La Tabla 2 muestra los valores de  $f_g$  y  $f_0$  para estos casos.

TABLA 2.  $f_g$  y  $f_0$  para las diferentes conductividades

f [kHz]		2300	1400	1000	700	500	200
$\sigma$ [Siem]	$f_g$ [Hz]	$f_0$	$f_0$	$f_0$	$f_0$	$f_0$	$f_0$
$1,4 \cdot 10^6$	2098	1096	667	476	333	238	95
$2,0 \cdot 10^6$	1498	1534	934	667	467	333	133
$3,3 \cdot 10^6$	899	2557	1557	1112	778	556	222
$10,0 \cdot 10^6$	299	7673	4670	3336	2335	1668	667

En las curvas correspondientes <sup>7</sup>, se puede ver que para valores muy altos de  $f_0$  la sensibilidad a pequeños  $\delta\sigma$  va disminuyendo. Por lo tanto, se decidió trabajar con las cuatro frecuencias más bajas en los canales 1 a 4 del MAD4D para la detección de hidruros, agujeros y desgaste, y con las cuatro más altas para los defectos internos.

### Calibración y medición de defectos pasantes

La calibración primaria se hizo con el agujero 2, aumentando la ganancia a valores compatibles con una buena relación señal/ruido. Luego se ajustó la escala en la pantalla, de manera que la señal ocupara por lo menos 2 divisiones de la misma. Para cada frecuencia, se ajustó la fase hasta lograr un ángulo de 45° con el eje de las (-x). La figura 3 muestra estas señales y las condiciones de trabajo para las cuatro frecuencias. En estas condiciones, el agujero 1, no pasante, dio una señal pequeña pero claramente visible.

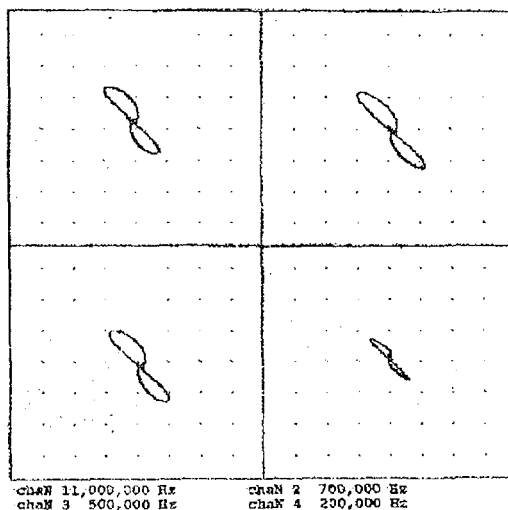


Figura 3. Agujero de calibración

En la figura 4 se observan las señales del agujero 5, donde las trazas externas delgadas corresponden al

desgaste y el "8" al agujero en la zona central.

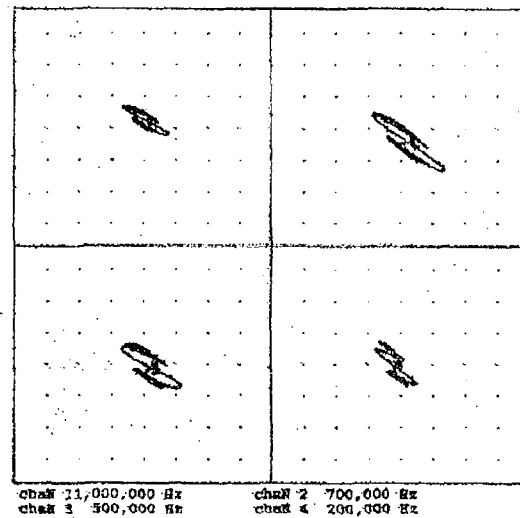


Figura 4. Desgaste externo con agujero

Para la calibración también se usan ranuras circunferenciales. Este tipo de defecto produce señales de gran amplitud, que sirven para la calibración del equipo para defectos más grandes. En este caso, se usó la unión a tope rectificada entre dos tubos.

Se obtuvo de esta forma dos conjuntos de condiciones de operación.

### Ampollas de hidruros

Las zonas de alta concentración de hidruros presentan deformaciones de la superficie de la vaina y, en algunos casos, fisuras internas muy pequeñas, siendo por lo tanto las señales muy complejas. Para su estudio, se debe separar los efectos del cambio de conductividad debido a la concentración de hidruros de los otros. En el caso del hidruro 1, luego de eliminar la deformación superficial mediante desbastes con papel de CSi 600 y 1500, se obtuvo la señal de la figura 5, que muestra el desplazamiento desde el punto de balance sobre el material virgen hasta una zona de mayor conductividad.

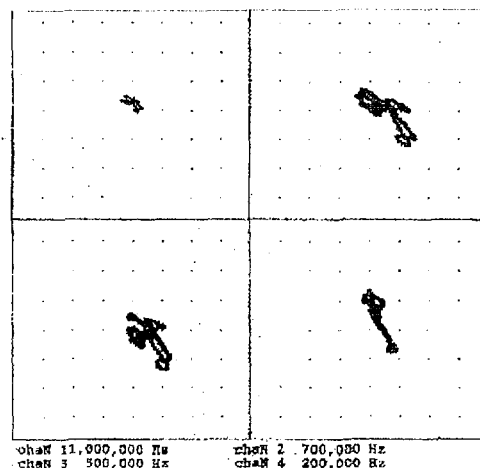


Figura 5. Ampolla de hidruro 1, después de pulido.

La figura 6 muestra la señal del hidruro 2, más compleja, donde se observa un desplazamiento similar al mencionado más las trazas propias de las microfisuras que se encontraban en la ampolla.

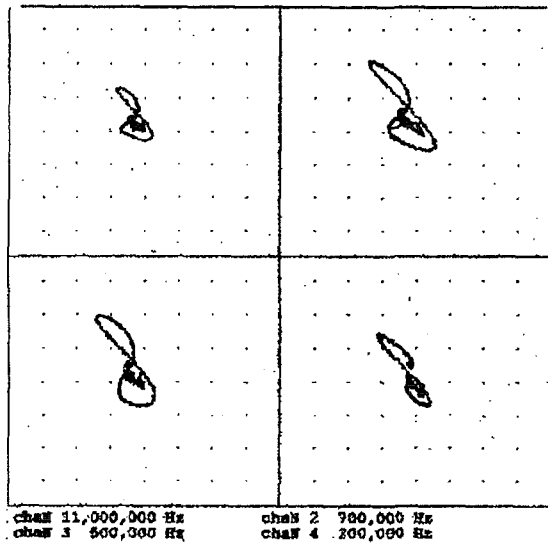


Figura 6. Hidruro 2 con fisuras.

### Defectos internos

Se pudieron detectar todas las ranuras. Las figuras 7 y 8 muestran las ranuras 2 y 6 con una disminución nominal de espesor del 25%, donde se observa el cambio de amplitud debido a diferente ancho.

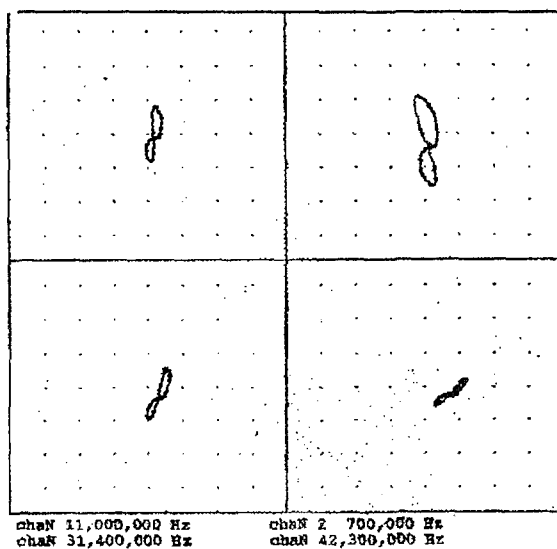


Figura 7. Defecto interno, 25% espesor de pared, 0,5 mm de ancho, nominal

Sin embargo por el momento no se observa una buena correlación entre las profundidades nominales de los defectos y las fases encontradas para un mismo

ancho. Se están midiendo por perfilometría óptica las dimensiones de los defectos.

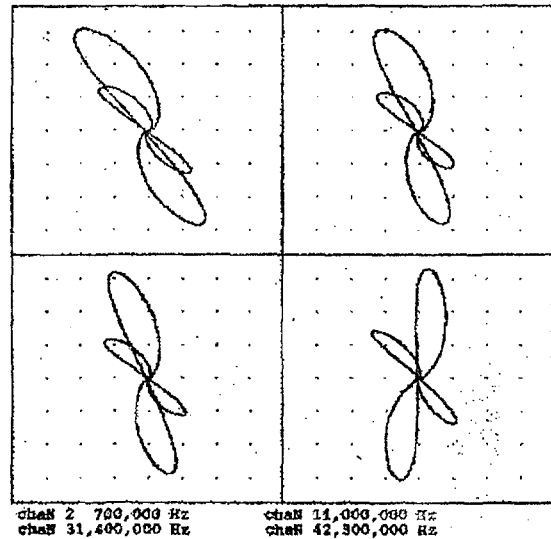


Figura 8. Junta a tope y defecto interno.

### Otros ensayos

Con la sonda con mayor lift-off se obtuvieron también buenos resultados, pero se debió aumentar un poco la escala en la pantalla. Se repitió una parte del trabajo con un MIZ-22, a 900 y 450 kHz. La detección de las indicaciones fue buena, no así la relación señal/ruido ni la calidad de las salidas gráficas.

Se almacenaron en ASCII las señales tomadas con el MAD4D para futuras aplicaciones.

Se hizo algún ensayo con palpador, pero no se obtuvieron resultados satisfactorios.

### III. DISCUSIÓN

El trabajo experimental que se presenta implicó una tarea coordinada de tres grupos: ensayos posirradiación, daño por hidrógeno y ensayos no destructivos. Basado en la experiencia previa, se definió el tipo de defectos a detectar, se buscaron métodos para construir y caracterizar los patrones, se diseñó el dispositivo de desplazamiento de las sondas y se puso a punto en laboratorio el procedimiento de ensayo.

El procedimiento de ensayo para la detección de indicaciones tan pequeñas como las que nos ocupan exige emplear patrones con defectos simulados similares a cillas y trabajar en condiciones de ganancia y amplificación muy específicas. El equipo y las sondas deben presentar una muy buena relación señal ruido y alta estabilidad.

En la construcción de patrones mecanizados, es necesario poner especial cuidado en no dañar los tubos debido a que el espesor de pared es de 0,4 mm y en ajustarse a las profundidades especificadas.

Asimismo, en la preparación de las ampollas de hidruros, la puesta a punto implica optimizar la duración del tratamiento térmico para controlar la formación de los hidruros. Está en desarrollo la obtención de ampollas de hidruros por gradientes de tensión. Estas tareas seguirán avanzando hasta la obtención de defectos con las características buscadas.

El dispositivo mecánico para el desplazamiento axial de las sondas, diseñado y construido para este trabajo, permitió realizar todas las mediciones a velocidad uniforme. Los datos que se almacenaron son por lo tanto aptos para la aplicación de algoritmos de análisis automático, que se están desarrollando en el laboratorio.

Se encontró que para la detección de hidruros, frecuencias entre 500 y 700 kHz (que corresponden a valores de  $f_0$  del orden de 300 y que están por debajo de  $f_{90}$ ) dan los mejores resultados. Para los defectos externos, la sensibilidad es buena para frecuencias mayores que 500 kHz, y para los internos las frecuencias altas, superiores a  $f_{90}$  ( $f_0 > 650$ ), son las más adecuadas. Para éstas, hay que recalcular las bobinas, ya que las empleadas en este trabajo, calculadas para un rango de balance 150-1500 kHz, tenían una baja relación señal/ruido por encima de 2,5 MHz.

El sistema que se ha desarrollado puede ser aplicado en celda caliente con leves modificaciones, básicamente referidas a la operación remota. Para su uso en pileta, el dispositivo debe ser adaptado para trabajar bajo agua.

#### IV. CONCLUSIONES

Se desarrolló un procedimiento de laboratorio para el ensayo de vainas de EC por corrientes inducidas con sondas externas, para lo cual

- se definieron los "defectos esperables"
- se están desarrollando técnicas para la obtención de patrones mecanizados y/o por tratamiento térmico similares a los esperables,

- se diseñaron y construyeron las sondas y el dispositivo mecánico para su desplazamiento
- se buscaron las condiciones óptimas de detección de los distintos defectos simulados: frecuencias del orden de 500 a 700 kHz para hidruros (del orden de  $f_{90}/2$ ) y mayores que 1,4 Mhz para defectos internos.

El paso siguiente es el ensayo de vainas quemadas, que debe hacerse en celda caliente.

#### Agradecimientos

A los Sres. Migliore, Acosta, Caggiano y Bucci por el mecanizado de distintas piezas y patrones.

Al Organismo Internacional de Energía Atómica por la financiación parcial de este trabajo a través del Contrato de Investigación 6248 RB/R4.

#### Referencias

- 1- Onsite Nondestructive Examination Techniques for Irradiated Water-Cooled Power Reactor Fuel Guidebook, IAEA .
- 2- Argonne National Laboratory, Standard Examination Procedures, (1989).
- 3- Domizzi G., R.A. Enrique, J. Ovejero García, G.C. Buscaglia. J.Nucl.Mater., **229**, 36, (1996).
- 4- Savin V.I. , R.A. Andriyevskiy, Ye.B. Boyko, R.A. Lyutikov, Phys. Met. Metall, **24**(4), 54-58, (1967).
- 5- Bickel P.W., T.G. Berlincourt, Phys. Rev. B, **2**(12), 4807-4813, (1970).
- 6- Cecco V.S., G. Van Drunen, F.L. Sharp, Eddy Current Testing, Manual of Eddy Current Methods, vol I, report AECL-7523, (1981).
- 7- Blitz J. , Electrical and Magnetic Methods of Non Destructive Testing, Adam Hilger, (1991).
- 8- Förster F. , Nondestructive Testing Handbook, vol 4, (1986).