



Miguel AULLO CHAVES es Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Desde 1985 es Ingeniero de Diseño Mecánico en el Departamento de Ingeniería del Producto de ENUSA. Ha trabajado durante un año en la División del Combustible de Westinghouse en Columbia (Carolina del Sur) en el diseño mecánico y análisis dinámico de combustibles PWRC.



Ana I. SAINZ DE CUETO TORRES es Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Su experiencia en la industria nuclear comienza en el proyecto civil de centrales. En la actualidad es Ingeniero de Diseño Mecánico en el Departamento de Ingeniería del Producto de ENUSA. Ha trabajado durante seis meses en la División del Combustible de Westinghouse en Columbia (Carolina del Sur) en el diseño y análisis mecánico de combustibles PWRC.



Antonio GONZALEZ RODRIGUEZ es Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Su especialización en el campo nuclear comienza en el proyecto mecánico de centrales. En la actualidad es Ingeniero de Diseño Mecánico en el Departamento de Ingeniería del Producto de ENUSA. Ha trabajado durante seis meses en diseño mecánico del combustible BWR en la División del Combustible de GE en San José (California).

DESARROLLO MECANICO DE COMBUSTIBLES PARA REACTORES DE AGUA LIGERA

M. AULLO - A. SAINZ DE CUETO - A. GONZALEZ

INTRODUCCION

El desarrollo de un conjunto combustible para reactores de agua ligera exige la participación de ingenieros de diseño nuclear, termohidráulico, de seguridad y mecánicos. El diseño es un proceso interactivo en el cual cada grupo optimiza su parte e informa a los demás de los resultados y de los cambios necesarios. En este artículo se describe el proceso de desarrollo de un conjunto combustible

y se presentan los trabajos de diseño mecánico necesarios para que de este proceso resulte un producto fabricable, definido perfectamente por unos planos y especificaciones y que cumpla los requisitos funcionales y de operación exigidos.

DESCRIPCION DEL CONJUNTO COMBUSTIBLE

En la figura 1 se representa un conjunto combustible para reactores de agua a presión (PWR) y otro para reactores de agua en ebullición (BWR).

Un conjunto combustible está constituido por un haz de barras combustibles dispuestas en una malla cuadrada y soportadas a intervalos regulares de su longitud por rejillas que mantienen la distancia deseada entre ellas. Unas piezas metálicas en los extremos del conjunto (cabezales superior e inferior) sirven como interfase con las placas del núcleo y posibilitan su manejo. En los conjuntos para reactores de agua a presión, la posición de algunas de las barras combustibles está ocupada por tu-

TI ENSAYOS

Características estructurales

Conjunto combustível

- Rigidez lateral y axial.
- Frecuencias propias.
- Amortiguamiento interno.
- Características de impacto.
- Distribución de cargas.
- Fuerza de carga de barras.
- Transporte y manejo.

Uniones

- Capacidad.
- Curva Carga-Deformación.
- Efectos de ciclos de carga.
- Efectos de ciclos térmicos.
- Modo de fallo.

Rejillas

- Resistencia estática y dinámica.
- Rigidez.
- Modo de fallo.
- Coeficiente de restitución.
- Curvas Carga-Deformación de muelles y resaltes.

Cabezales

- Rigidez.
- Distribución de tensiones.

Resortes

- Curva Carga-Deformación.

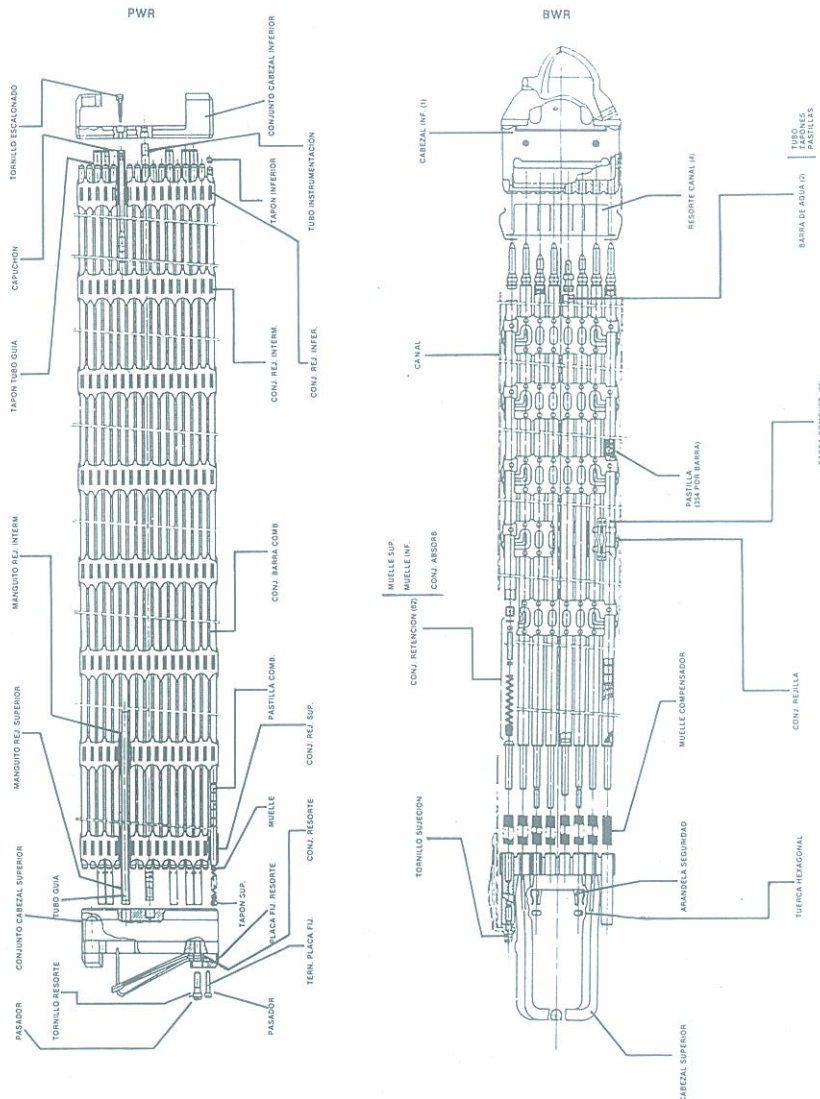
Características hidráulicas

Ensayo en Lazo Cerrado

- Desgaste de barras por fricción.
- Coeficiente de pérdida de carga.
- Fuerzas hidráulicas de empuje.
- Vibraciones inducidas por el flujo.
- Compatibilidad hidráulica.
- Desgaste de tubos guía.
- Tiempo de caída de barras de control.

Ensayo de Flujo de Calor Crítico

- Correlación de LEN.



FI Conjuntos combustibles.

bos que sirven de guía para las barras de control y se unen a los cabezales y a las rejillas fijando su situación; además, otras posiciones pueden estar ocupadas por tubos para permitir el paso de la instrumentación. En los conjuntos para reactores de agua en ebullición, los cabezales están unidos por barras combustibles especiales (barras de sujeción) y la posición de otras barras está ocupada por barras huecas (barras de agua) que fijan la posición axial de las rejillas.

Las barras combustibles constan de un apilamiento de pastillas cerámicas de dióxido de uranio en el interior de un tubo cuyos extremos están cerrados por tapones soldados; un muelle situado en la parte superior

de la columna impide el movimiento de ésta durante el manejo y transporte.

PROCESO DE DISEÑO

En la figura II se esquematizan las líneas generales del proceso del desarrollo de un conjunto combustible. En los primeros pasos del desarrollo, según el estado de la tecnología, el mercado y las necesidades de los clientes, se fijan los requisitos básicos que debe satisfacer el nuevo producto.

A la vista de éstos se elabora un diseño conceptual y se establecen los criterios que permitirán asegurar el cumplimiento de los requisitos impuestos. A partir de este diseño con-

ceptual se preparan unos diseños preliminares del conjunto y sus componentes, verificándose el cumplimiento de los principales criterios, se identifican los ensayos necesarios y se establecen contactos con los responsables de la fabricación para contrastar la factibilidad de las soluciones adoptadas.

En la etapa final se fabrican los prototipos necesarios para la cualificación de nuevos procesos de fabricación o para la realización de los ensayos planificados. En este periodo, las modificaciones son mínimas y es entonces cuando se verifican en detalle los criterios de diseño.

Los primeros conjuntos de nuevo diseño que vayan a entrar en operación son caracterizados completamente



FII Proceso de desarrollo.

para mantener un estrecho seguimiento de su comportamiento en el reactor y establecer las correcciones oportunas si hubiera lugar.

A lo largo del proceso se mantienen diversas «Revisiones de Diseño» en las que un equipo revisor integrado por especialistas en las diversas materias objeto de revisión y que no han participado en el desarrollo de las mismas hacen un examen crítico del mismo. Como resultado surgen acciones que el equipo de diseño debe finalizar para que el equipo revisor dé su aprobación a la documentación presentada y recomendaciones no preceptivas para dicha aprobación. En este proceso el grupo encargado del diseño mecánico es responsable de:

- El diseño y análisis estructural, determinando las cargas aplicadas y asegurando que se satisfacen los criterios de diseño cuando éstas actúan.

- Diseño y especificación de materiales.

- La fabricabilidad, asegurando que todas las partes del diseño son

compatibles con los requisitos de fabricación, buscando el consenso con la ingeniería de planta.

- Asegurar la compatibilidad con los elementos internos del reactor, los equipos de manejo, los contenedores de transporte y las instalaciones de almacenamiento.

- El diseño y análisis termomecánico de las barras combustibles.

- El diseño, especificación y seguimiento de los ensayos necesarios para la verificación del diseño, contando con el soporte de los demás grupos de ingeniería si el ensayo incide en su área de responsabilidad.

- La edición de los planos y especificaciones del producto, introduciendo los cambios necesarios y obteniendo la aprobación de los demás grupos implicados.

- Seguimiento del comportamiento del combustible durante su irradiación, estableciendo medidas correctoras si fuese necesario.

VERIFICACION DEL DISEÑO

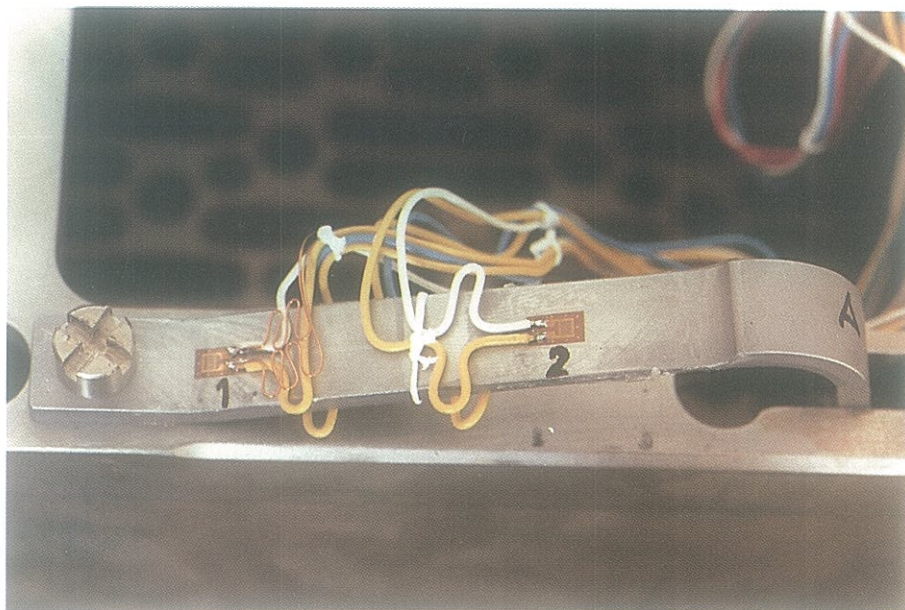
El conjunto combustible se diseña para cumplir unos requisitos funcio-

nales y de operación específicos. Fijados éstos, se deben establecer unos criterios de diseño cuya satisfacción garantice el cumplimiento de los requisitos. El diseñador debe verificar que todos los criterios se cumplen durante la operación normal, en condiciones de accidente y durante el manejo, transporte y almacenamiento. Para ello dispone de tres métodos:

- Experiencia en operación.
- Ensayos de prototipos.
- Procedimientos analíticos.

La experiencia en operación permite la verificación de criterios específicos, extrapolando el comportamiento observado en operación de un conjunto combustible o un componente asimilable al que está en proceso de desarrollo. Muchos de los modelos de materiales y de comportamiento del combustible se obtienen del seguimiento de la operación en central.

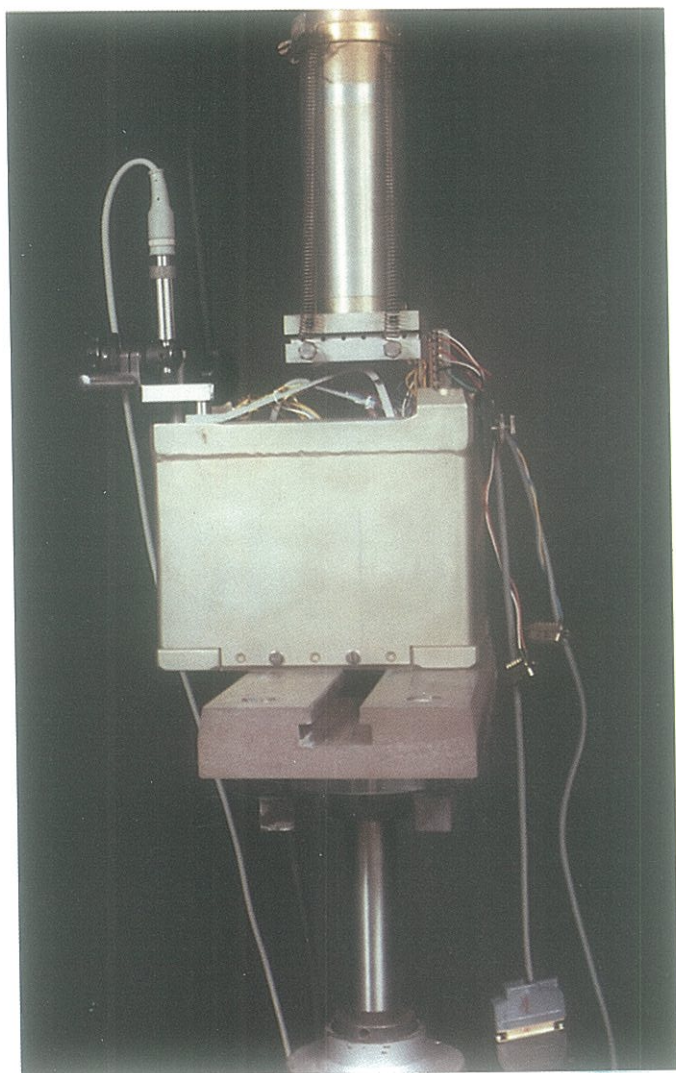
ENUSA participa en el programa internacional TRANS-RAMP II, de análisis del comportamiento del combustible bajo condiciones de PCI y que le ha permitido, además, acce-



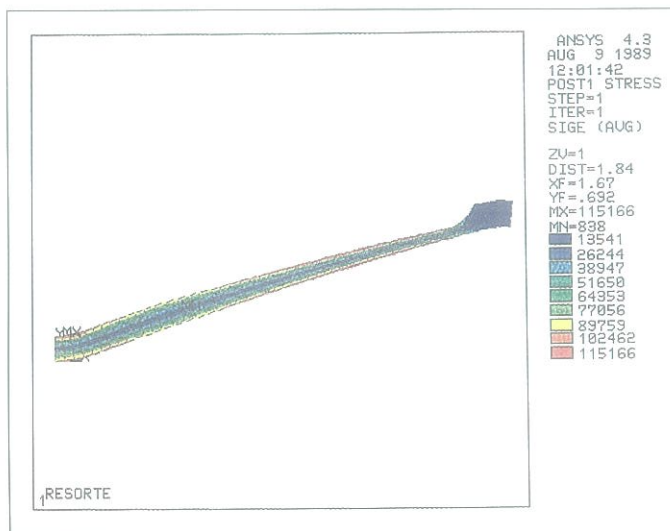
FIV Resorte instrumento.

FIII Barra segmentada.



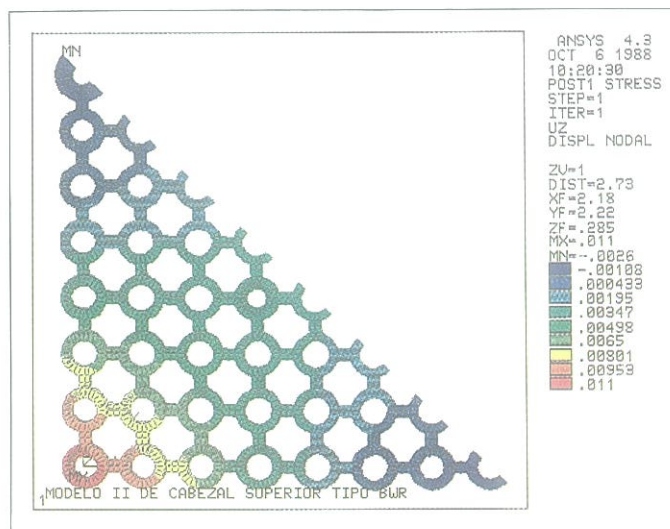


FV Ensayo del resorte.



FVI Modelo de resorte.

FVII Modelo de cabezal superior BWR.



der a interesantes datos sobre comportamiento en otras condiciones. ENUSA ha desarrollado un sistema de barras segmentadas (véase figura II), en las que la barra combustible está formada por otras más cortas unidas axialmente y de una longitud tal que sean aptas para ser irradiadas posteriormente en reactores experimentales o en celdas calientes. Los ensayos, además de ser un método directo de verificación de criterios de diseño, se utilizan para comprobar que los resultados obtenidos por modelos analíticos se ajustan a la realidad, para obtener los valores de alguno de los parámetros usados en el diseño y para deducir datos que permitan formular modelos empíricos cuando es difícil obtener un modelo teórico adecuado. En la tabla I se enumeran los ensayos más relevantes en el desarrollo de un conjunto combustible.

Los procedimientos analíticos se usan cuando el coste de los ensayos es excesivamente elevado, o bien cuando la experiencia anterior demuestra que los modelos son suficientemente precisos y, por lo tanto, la realización de ensayos no es necesaria; además, resultan imprescindibles cuando se desea extrapolar los resultados experimentales a condiciones reales diferentes de las ensayadas. En la tabla II se muestran las herramientas usadas en el análisis.

A continuación se presentan algunas de las realizaciones de ENUSA para la verificación de sus diseños.

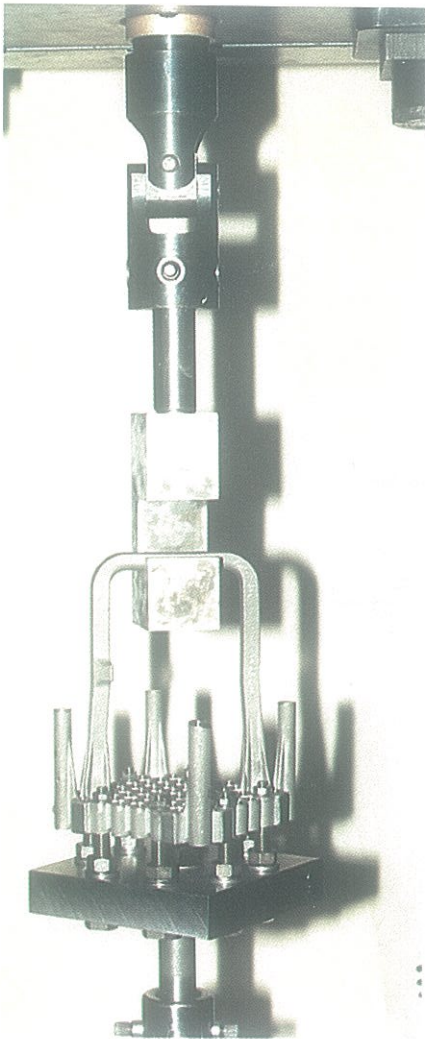
RESORTE

Con el fin de verificar el modelo teórico de comportamiento del resorte del cabezal superior de uno de los combustibles de ENUSA, se ensaya-

ron a compresión varios prototipos; la figura IV muestra uno de ellos instrumentado para el experimento y la figura V representa un momento del ensayo. Este ensayo permitió verificar la validez de un modelo de elementos finitos mediante el cual se analizaron varias geometrías nuevas del resorte. El modelo de elementos finitos se incluye en la figura VI.

CABEZAL

Los cabezales son los elementos del conjunto combustible que interfieren con los demás componentes del núcleo y los útiles de manejo; por ello, su análisis estructural y el estudio de su compatibilidad es crítico. La figura VII muestra un modelo de la placa del cabezal superior de un combustible BWR verificado mediante el ensayo de la figura VIII.



LMS CADA-X REV 2.2



ANALISIS 1
04-04-89
18:01:53
MODE 5
FLEXION-3
24.379 HZ
0.964 %



FX Modo propio de vibración.

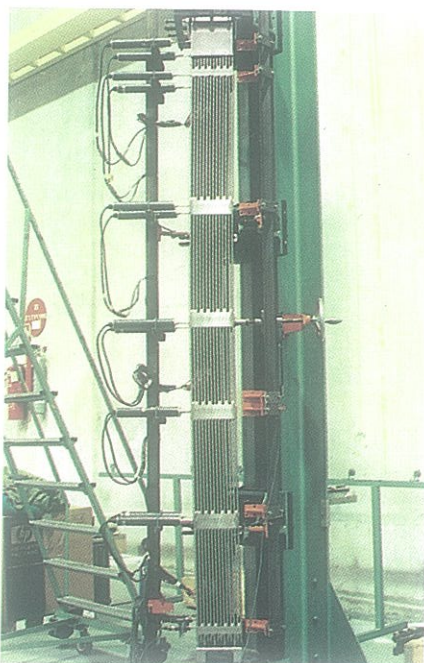
CONJUNTO COMBUSTIBLE

El análisis estructural del conjunto combustible exige la realización de cálculos complejos utilizando diversos programas para la modelización del conjunto y su comportamiento en la vasija del reactor, teniendo en cuenta la interrelación entre los conjuntos dentro de núcleo y con las pantallas. Para la obtención de algu-

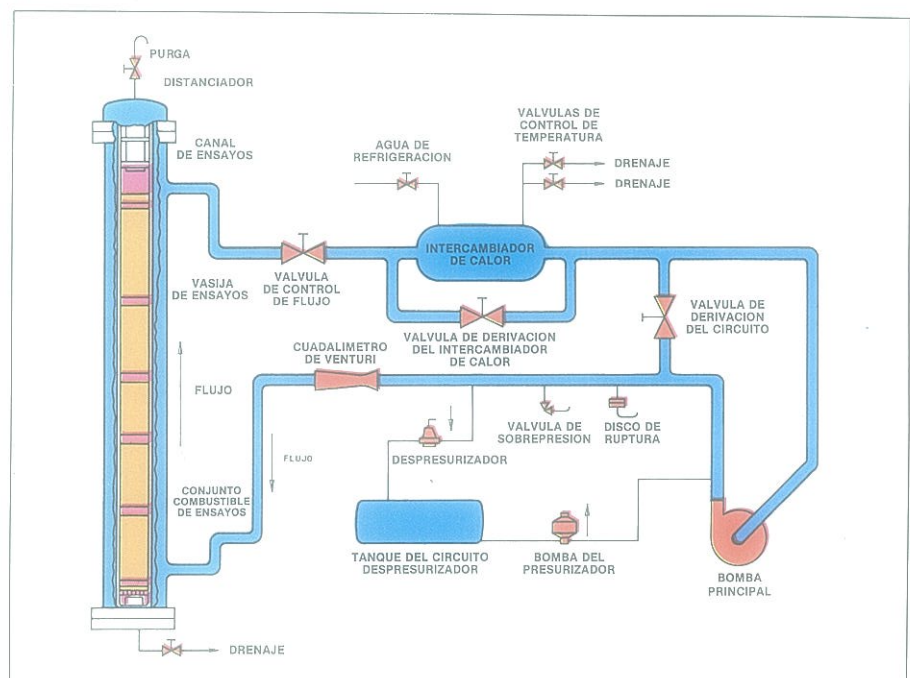
nos de los parámetros usados en este estudio (rigideces, amortiguamientos, frecuencias y modos propios de vibración, etc.) y la validación de los modelos se realizan ensayos estáticos y dinámicos sobre el conjunto completo. En la figura IX puede verse la estructura soporte y el espécimen instrumentado en un ensayo realizado en la fábrica de ENUSA en Juzbado (Salamanca) y en

FVIII Ensayo del cabezal BWR.

FIX Ensayo mecánico de conjunto combustible PWR.



FXI Circuito para ensayo hidráulico.



TII

HERRAMIENTAS DE ANALISIS

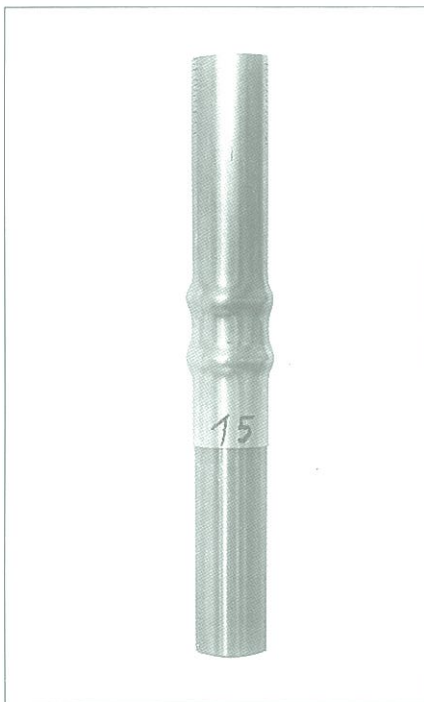
Programas de elementos finitos de carácter general

- Obtención de propiedades dinámicas del conjunto.
- Análisis estructural del conjunto.
- Análisis estructural de componentes.
- Distribución de temperaturas.

Programas específicos

- Obtención de cargas.
- Análisis dinámico del núcleo.
- Corrosión.
- Desgaste por fricción.
- Colapso de vaina.
- Fatiga.
- Espaciado de canales.

Programas de comportamiento de la barra combustible



FXII Muestra de unión expansionada.

la figura X una de las formas propias de vibración del elemento obtenidas en el ensayo.

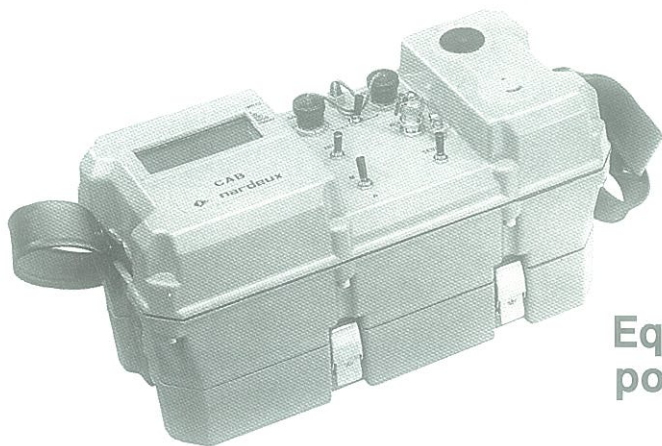
OBTENCION DE CARACTERISTICAS HIDRAULICAS

Debido a la complejidad geométrica de sus componentes, las predicciones analíticas sobre las características hidráulicas del conjunto combustible tienen gran margen de error; por ello, para su obtención se realizan ensayos a escala real en un lazo. La figura XI es un esquema del circuito de ensayos usado para caracterizar el combustible 14 x 14 LOLO-PAR de ENUSA.

UNIONES

Un elemento clave en los conjuntos PWR son las uniones de las rejillas a los tubos guía por expansionado mecánico. El diseño debe congujar la resistencia mecánica con la ausencia de grietas y evitar la estricción del tubo guía. En la figura XII aparece una muestra preparada para ensayar.

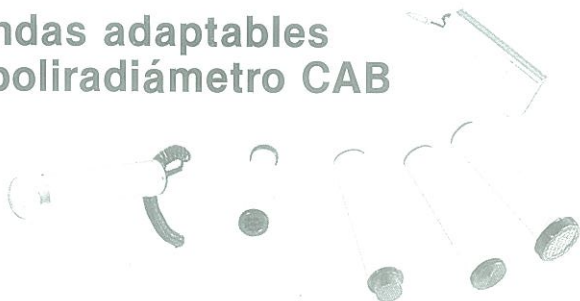
MEDIDA DE RADIACIONES



Equipo marca NARDEUX, modelo poliradiámetro CAB

- Sólo control α
- Sólo control β
- Control $\alpha\beta$ simultáneo

Sondas adaptables al poliradiámetro CAB



PRODUCTOS ESPECIALES, S. L.

Radioprotección, Material de Seguridad, Aparatos Médicos
Caídos de la División Azul, 1 - 28016 MADRID
Tfno.: (91) 457 29 49/94 - Tx.: 42050 PRES E