

ENSAYOS HIDRODINAMICOS PARA VERIFICACIÓN DE DISEÑO DE UN ELEMENTO COMBUSTIBLE PARA REACTORES DE INVESTIGACIÓN

A. Pastorini, C. Belinco



AR9800033

Estudio y Ensayo de Componentes Estructurales - U.A. Ensayos No Destructivos

Comisión Nacional de Energía Atómica

Av. Gral. Paz y Av. Constituyentes, (1650) San Martín, Buenos Aires, Argentina; Fax: (54) 1-754-7355

E-mail: pastorin@cnea.edu.ar

Durante el diseño de un Elemento Combustible para un reactor nuclear se requiere de la realización de ensayos con el objeto de verificar el comportamiento de ese diseño y permitir, de ser necesario, la introducción de modificaciones al mismo. Para verificar las características de respuesta dinámica e integridad estructural, se realizan ensayos de vibraciones que incluyen someter al prototipo a condiciones de circulación del fluido similares a las que soportará durante la operación del reactor. Estos ensayos se realizan en facilidades de ensayos conocidas como Circuitos Hidrodinámicos, que permiten no sólo someter el prototipo al flujo de fluido, sino también obtener una adecuada caracterización de la respuesta del mismo a través del uso de sensores de distinto tipo.

En este trabajo se describen los ensayos realizados sobre un prototipo de elemento combustible de 19 placas destinado a un reactor de investigación multipropósito de baja potencia. Los ensayos tuvieron como objetivo conocer la respuesta dinámica de las placas individuales y del elemento combustible en su conjunto ante distintas condiciones de caudal de fluido. En el trabajo se incluye una descripción de las facilidades de ensayo utilizadas y una presentación de los resultados obtenidos durante la caracterización dinámica del prototipo y durante los ensayos con circulación de fluido.

During the design steps of a Fuel Bundle for a nuclear reactor, some vibration tests are usually necessary to verify the prototype dynamical response characteristics and the structural integrity. To perform these tests, the known Hydrodynamic Loop facilities are used to evaluate the vibrational response of the bundle under the different flow conditions that may appear in the reactor.

The paper describes the tests performed on a 19 plate fuel bundle prototype designed for a low power research reactor. The tests were done in order to know the dynamical characteristics of the plates and also of the whole bundle under different flow rate conditions. The paper includes a description of the test facilities and the results obtained during the dynamical characterization tests and some preliminary comments about the tests under flowing water are also presented.

I. INTRODUCCIÓN

Los elementos combustibles (EC) utilizados en los distintos tipos de reactores están sometidos a un flujo de fluido externo que posibilita la extracción del calor generado en los mismos. Esta circulación de fluido induce sobre los EC vibraciones mecánicas que, de resultar elevadas, pueden originar daños por fatiga o desgaste excesivo de los componentes.

Si bien en la etapa de diseño se cuenta con guías que permiten estimar el nivel de vibraciones, es de práctica usual, una vez construido un prototipo del EC, ensayarlo para evaluar su comportamiento vibratorio en condiciones similares a las de trabajo.

Los ensayos se dividen generalmente en tres etapas. En la primera de ellas, el EC es caracterizado en aire obteniéndose frecuencias naturales, amortiguamientos y formas modales. En esta etapa es de utilidad contar con un modelo computacional del EC, por ejemplo por medio de un programa de elementos finitos, lo que posibilita una mejor comprensión de los resultados obtenidos.

La segunda etapa consiste en repetir los pasos anteriores pero con el EC rodeado de agua estanca. Esta etapa debería permitir obtener información acerca de la

masa de agua asociada y sobre el amortiguamiento debido al fluido.

Finalmente la tercera etapa consiste en ensayar al EC en un circuito hidrodinámico con fluido circulante en condiciones tales que las fuerzas excitadoras se asemejen a las que se producirán en el reactor, midiendo con sensores apropiados la respuesta vibratoria del EC. Esta etapa puede incluir también ensayos donde las solicitaciones sean mayores que las nominales previstas, de forma de poder establecer la tolerancia del diseño a condiciones más severas de excitación.

En este trabajo se describen los ensayos de verificación de diseño realizados a un elemento combustible de 19 placas para un reactor multipropósito (MPR) actualmente en construcción en Egipto, construido por INVAP, una empresa asociada a la CNEA.

II. DESCRIPCIÓN DEL ELEMENTO COMBUSTIBLE

Para los distintos ensayos se utilizó un prototipo de EC. El mismo consta en primer término de la boquilla inferior que permite el paso del agua de refrigeración y

actúa como elemento de soporte del conjunto ya que es el elemento que se introduce en la grilla del reactor y donde se fija la herramienta de sujeción del EC. Sobre esta boquilla se encuentran dos placas estructurales de aluminio que forman dos de los lados del prisma y que en su lado interior tienen las ranuras donde se montan las placas combustibles. Estas últimas, en número de 19 y espaciadas regularmente para permitir el flujo de agua, están colocadas en dirección perpendicular a las placas estructurales siendo las externas de mayor longitud que las internas. El prototipo usado era escala 1:1, y presentaba las siguientes características principales:

| | |
|-------------------------------------|----------------------------|
| Masa del elemento combustible | : 8.96 Kg |
| Masa de las placas laterales | : 0.36 Kg |
| Masa de las placas internas | : 0.33 Kg |
| Longitud total del EC | : 1.215 m |
| Dimensiones de las placas laterales | : 1.01 x 0.0745 x 0.0015 m |
| Dimensiones de las placas internas | : 0.84 x 0.0745 x 0.0015 m |
| Área de pasaje entre placas | : 1.8 E-4 m ² |
| Área de pasaje total | : 3.98 E-3 m ² |
| Caudal nominal | : 66 m ³ / h |

En los ensayos con agua circulante, la simulación de las condiciones reales de contorno del EC fue considerada introduciendo al mismo en un canal circular, el cual en su interior tenía una caja de sección cuadrada que simulaba la presencia de los elementos combustibles vecinos como ocurre en el reactor. El EC fue sujetado en su parte inferior por medio de una herramienta especial en forma similar a como lo estará en el reactor.

En la Figura 1 puede apreciarse un esquema del EC introducido en la sección de ensayos, la herramienta de sujeción y el sentido de circulación del agua.

III. DESCRIPCIÓN DEL CIRCUITO DE ENSAYOS

Para la realización de los ensayos en agua circulante la sección de ensayos fue conectada a un circuito de baja presión (CBP), cuyos componentes principales son una bomba centrífuga que permite obtener caudales de hasta 200 m³/h con una presión de agua de 1.6 MPa, un intercambiador de calor que se utiliza para regular la temperatura a la cual se realizan los ensayos, dos circuitos de by-pass y una válvula reguladora que permiten establecer el caudal en el componente a ensayar. Este último es medido por una placa orificio y un manómetro en U. El circuito posee además una zona donde pueden montarse las distintas secciones de ensayo, apropiadas para cada componente, las que se conectan al circuito por medio de una manguera de goma especial que reduce las vibraciones que el circuito transmite a la sección de ensayos. Este circuito es utilizado desde 1978 en la verificación de diseño de elementos combustibles y con las correspondientes secciones de ensayo puede

utilizarse para la evaluación hidrodinámica de otros componentes.

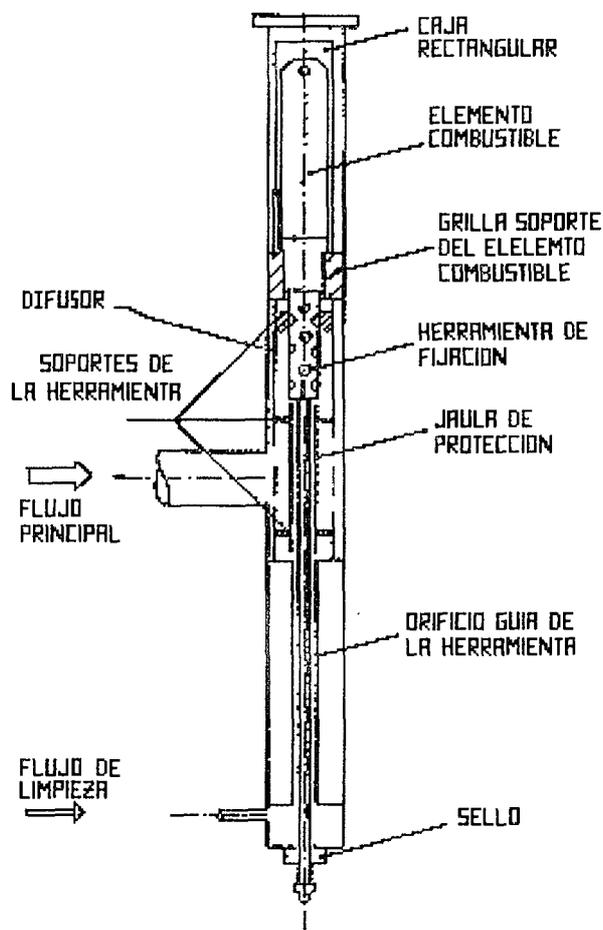


Figura 1: Esquema de la sección de ensayos.

Para los ensayos se utilizó agua desmineralizada y el circuito fue modificado, instalando una derivación en el caudal principal, para permitir establecer un caudal de limpieza de 0.5 m³/h adicional al caudal principal.

IV. INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA

Para la verificación del comportamiento vibratorio del EC fueron utilizados distintos tipos de sensores, los que fueron seleccionados de acuerdo al lugar dentro del conjunto formado por el EC y la herramienta de sujeción que se deseaba relevar.

En algunas placas combustible fueron instalados extensómetros sumergibles a diferentes alturas de las mismas para permitir detectar y analizar la posible presencia de distintos mecanismos de excitación, como turbulencia, desprendimiento de vórtices o inestabilidad fluidoelástica.

Dos transductores de desplazamiento fueron instalados para medir el desplazamiento relativo entre el combustible y el canal de ensayos, lo cual permite predecir la posibilidad de impactos entre combustibles

vecinos, dado que los mismos se encuentran muy próximos.

Otros tres sensores de desplazamiento fueron utilizados para medir las vibraciones de la herramienta de sujeción, dos en forma radial y el tercero axial.

Todas las señales fueron procesadas por medio de una computadora personal equipada con una plaqueta de adquisición de datos, utilizando programas de desarrollo propio.

V. ENSAYOS REALIZADOS

Para la caracterización dinámica de las placas y el elemento combustible se realizaron dos series de ensayos en aire y una en agua estanca. Los resultados buscados en estas series incluyen frecuencias naturales, amortiguamientos y masas asociadas.

La primera serie de ensayos fue realizada con la finalidad de obtener las frecuencias naturales del elemento combustible en su conjunto. Este fue montado en una grilla similar a la diseñada para el reactor, de forma que el tipo de soporte no influyera en las frecuencias naturales, quedando posicionado en forma vertical como se aprecia en la Figura 2.

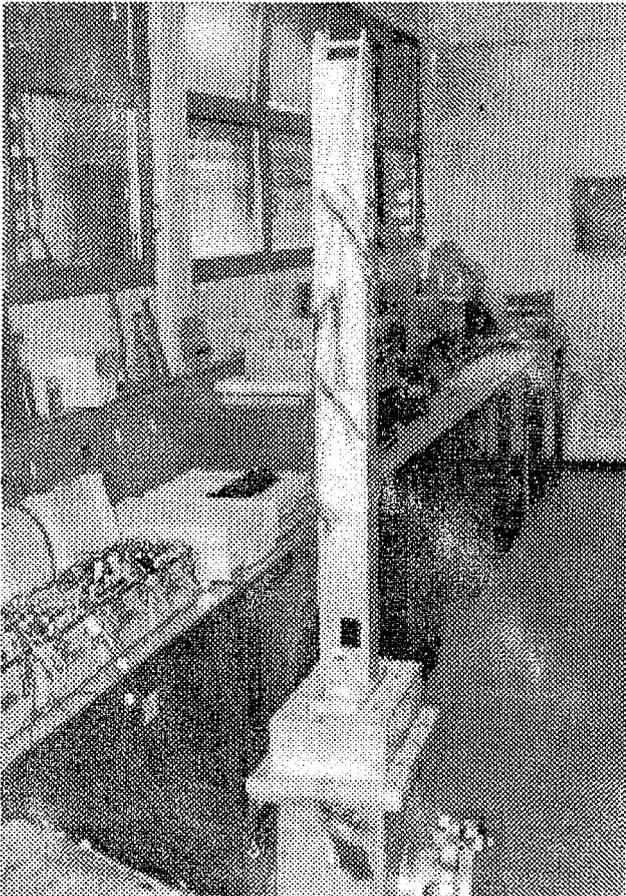


Figura 2: Elemento Combustible colocado en una grilla de soporte para los ensayos de caracterización dinámica en aire.

El método utilizado para la determinación de las frecuencias naturales consistió en producir impactos sobre el EC y medir la respuesta a los mismos por medio de dos acelerómetros piezoeléctricos, uno de los cuales fue fijado en una posición de referencia y el otro desplazado a diferentes posiciones como se presenta en la Figura 3.

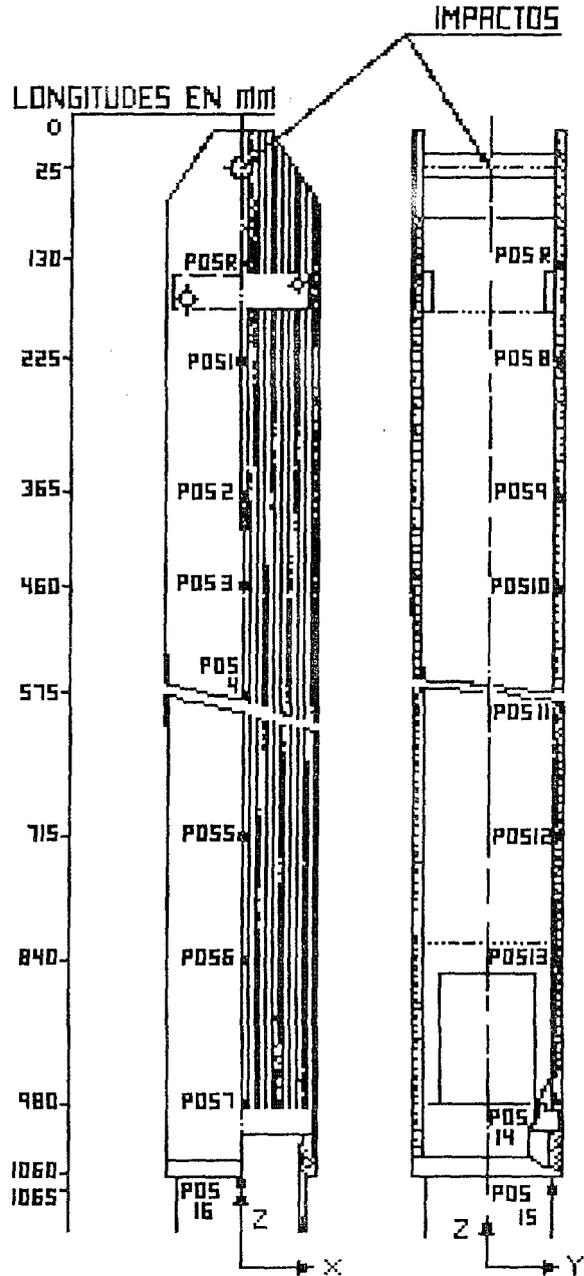


Figura 3: Posiciones utilizadas para el relevamiento de las formas modales del elemento combustible y ejes de referencia del sistema.

Para cada ubicación del segundo acelerómetro la función de respuesta en frecuencia fue obtenida por medio de un equipo analizador de señales de dos canales que utiliza la Transformada Rápida de Fourier. Un

ejemplo de los resultados obtenidos se presenta en la Figura 4. Del análisis de estas funciones fue posible identificar las frecuencias naturales, que se presentan en la Tabla 1 y las formas modales para los primeros modos de vibración.

| | Primer modo | Segundo modo |
|-------------|-------------|--------------|
| Dirección X | 37.5 Hz | 231/243 Hz |
| Dirección Y | 43.7 Hz | 181 Hz |

Tabla 1: Frecuencias naturales en aire del EC.

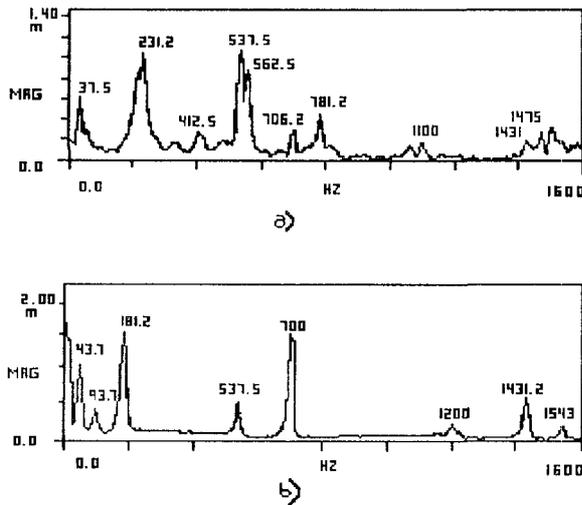


Figura 4: Espectros de caracterización dinámica del elemento combustible. a) espectro de respuesta en la dirección "X", b) espectro de respuesta en la dirección "Y".

Para realizar la caracterización dinámica de las placas, el EC fue posicionado horizontalmente sobre una mesa con la finalidad de reducir las vibraciones del combustible en su conjunto, ya que éstas podrían enmascarar las vibraciones de las placas. Para las placas internas la respuesta fue obtenida por medio de los extensómetros instalados en ellas, y en el caso de placas externas se utilizó un acelerómetro instalado en diferentes posiciones.

Los datos fueron analizados a través de la obtención de espectros en frecuencia, espectros cruzados y espectros de coherencia. Resultados característicos obtenidos para una placa interna pueden apreciarse en la Figura 5.

Para la obtención de la relación de amortiguamiento (el amortiguamiento real respecto al crítico) de las placas se utilizó el método del decremento logarítmico, filtrando la señal en el rango de frecuencias de interés y excitando a la placa por medio de un impacto. En la Figura 6 puede apreciarse la señal obtenida al impactar una de las placas.

La serie de ensayos en agua estanca permitió obtener la masa hidrodinámica (m_h) y el coeficiente de masa asociada (c_m) a partir de las frecuencias propias en agua (f_w) y en aire (f_a) mediante las siguientes expresiones propuestas por Chen⁽¹⁾ y por Chung y Chen⁽²⁾.

$$f_w = f_a \left(\frac{M}{M + m_h} \right)^{0.5}$$

$$m_h = \rho V c_m$$

donde M es la masa de la placa, ρ la densidad del fluido y V el volumen de fluido desplazado coincidente con el volumen de la placa.

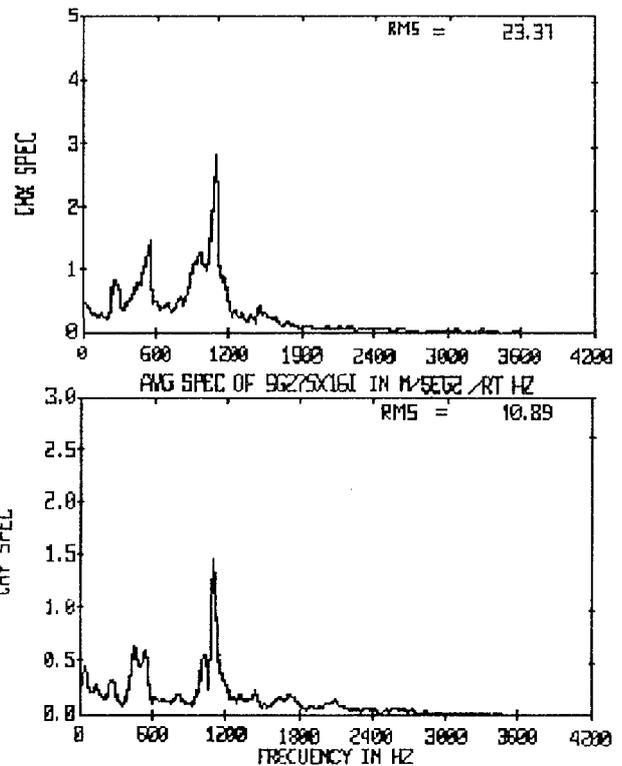


Figura 5: Espectros de respuesta obtenidos durante la caracterización dinámica en aire de placas internas del elemento combustible a partir de las señales de los extensómetros instalados en las mismas.

Para obtener las frecuencias naturales en agua de las placas, el conjunto fue sumergido en ese fluido, las placas impactadas y su respuesta obtenida mediante los extensómetros. En la Figura 7 pueden observarse espectros típicos para placas internas. Un resumen de los resultados obtenidos se presenta en la Tabla 2.

| | Placas internas | Placas externas |
|---------------------|-----------------|-----------------|
| Ensayos en aire | | |
| Frec.naturales [Hz] | 1080/1100 | 1080/1100 |
| Amortig. [%] | 1.42 | 1.47 |
| Ensayos en agua | | |
| Frec.naturales [Hz] | 470 | 685 |
| Amortig. [%] | 1.52 | 1.84 |
| Coef. de masa asoc. | 14.1 | 5.7 |

Tabla 2: Características vibratorias de las placas.

Adicionalmente a la determinación experimental de las características vibratorias de las placas, se desarrolló un modelo de las mismas por medio de un código de

elementos finitos para obtener las frecuencias naturales en aire. Los resultados obtenidos mediante este código se presentan en la Tabla 3 para los primeros modos de vibración. Debe remarcarse que los resultados obtenidos por este código permitieron elegir las zonas de las placas a instrumentar con extensómetros de forma de obtener mayores sensibilidades en los primeros modos de vibración.

| Número de modo | Placa interna [Hz] | Placa externa [Hz] |
|----------------|--------------------|--------------------|
| 1 | 1049.6 | 1049.9 |
| 2 | 1050.4 | 1053.6 |
| 3 | 1055.5 | 1059.7 |

Tabla 3: Frecuencias propias de las placas según código.

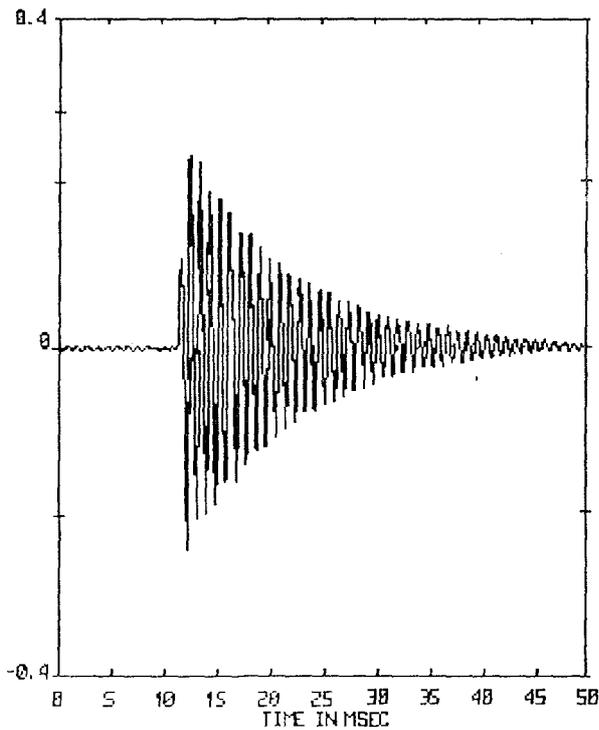


Figura 6: Señal de respuesta al impacto obtenida con un acelerómetro instalado en una de las placas externas.

Los ensayos en agua circulante consistieron en tres series. La primera serie cubrió un rango de caudales desde el 60 % al 150 % del nominal previsto para el EC, variando el mismo en pasos del 10 % y teniendo por objetivo relevar el estado vibratorio de las placas y el conjunto en ese rango de caudales. Como ejemplo de los resultados obtenidos, la Figura 8 presenta los espectros de frecuencia correspondientes a las señales de dos de los extensómetros instalados en una de las placas internas del EC para una condición de flujo de un 60% del caudal nominal. Por otra parte, la Figura 9, presenta espectros obtenidos a partir de dos transductores de desplazamiento colocados en la misma posición sobre la herramienta de fijación del EC pero midiendo en distinto ángulo y con un caudal de agua correspondiente al 100% del nominal.

La segunda serie de ensayos consistió en someter al EC a un caudal del 120% del nominal previsto durante un período continuado de 10 horas, al finalizar el cual, el EC fue sometido a una completa inspección visual y dimensional de acuerdo a lo especificado por el diseñador

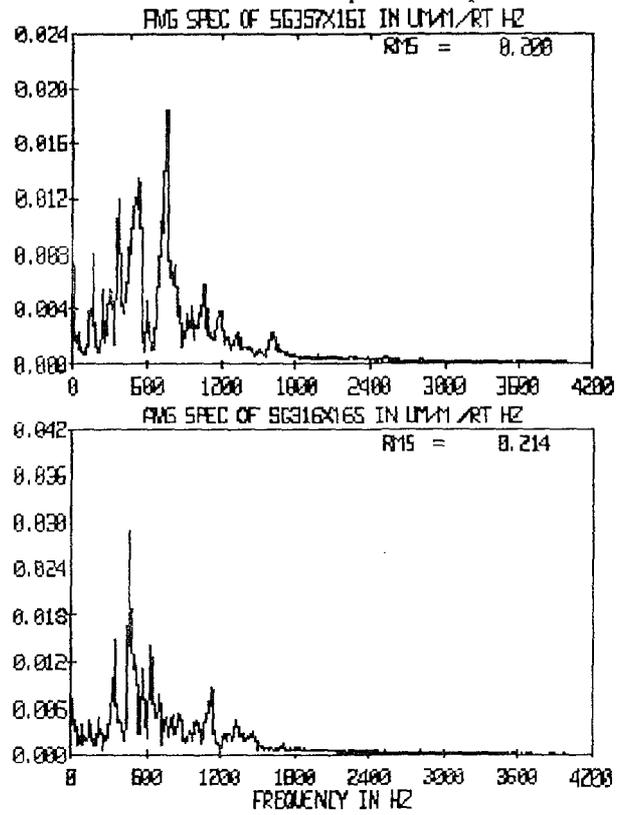


Figura 7: Espectros promediados de la respuesta registrada por extensómetros instalados en placas internas del elemento combustible durante los ensayos de caracterización dinámica en agua estanca.

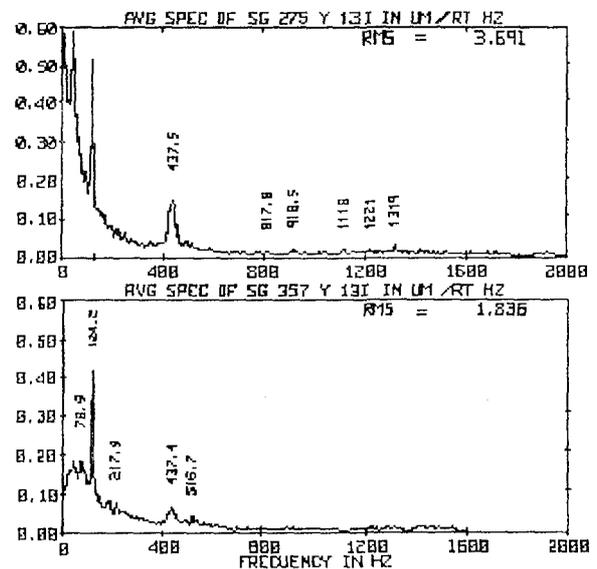


Figura 8: Espectros promediados obtenidos a partir de las señales de extensómetros instalados en placas internas del elemento combustible con un caudal de agua del 60% del nominal.

del mismo. Este ensayo estaba destinado a confirmar la integridad estructural del EC. Dado que éste presenta uniones abulonadas entre el cuerpo de la tobera inferior y la parte superior donde se alojan las placas combustibles y además tiene un asiento sobre la grilla del reactor de forma

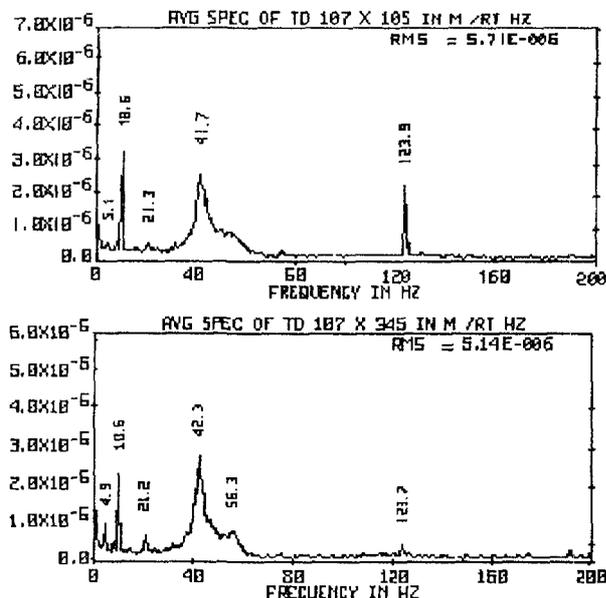


Figura 9: Espectros promediados obtenidos a partir de las señales de los transductores de desplazamiento instalados sobre la herramienta de sujeción del elemento combustible.

cuadrada con bordes agudos, la inspección fue especialmente dirigida a encontrar posibles aflojamientos o desgastes excesivos.

La última serie de ensayos tenía por objetivo investigar la velocidad de flujo crítica que indica el comienzo de vibraciones excesivas en las placas como consecuencia de inestabilidad fluidoelástica. En este caso, el ensayo comenzó con un caudal del 60% del nominal, el que fue incrementándose en pasos del 5% hasta alcanzar un caudal del 240% del nominal. Para este ensayo, las Figuras 10 y 11 presentan los valores de vibración medidos en función del caudal por cuatro extensómetros y un transductor de desplazamiento respectivamente.

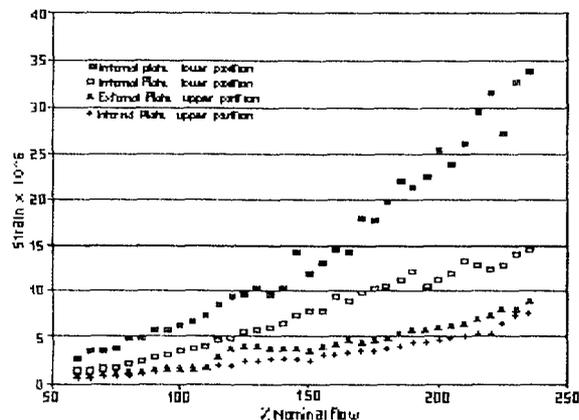


Figura 10: Amplitud de vibración RMS medida en algunos extensómetros en función del caudal de agua.

El análisis espectral de las señales de los extensómetros mostró la presencia de picos cuya

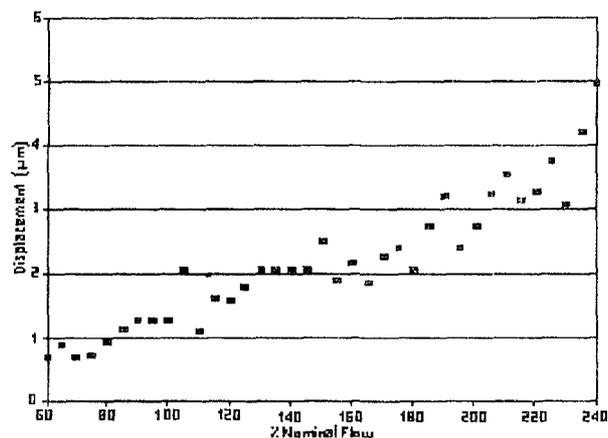


Figura 11: Amplitud de vibración RMS medida por uno de los sensores de desplazamiento en función del caudal de agua.

frecuencia variaba en forma lineal con la variación de caudal de agua. Un ejemplo de estos picos de frecuencia se puede ver en los espectros de las Figuras 8 y 12, que corresponden a caudales de agua de 39.6 m³/h y 138.6 m³/h respectivamente. La amplitud de estos picos de frecuencia no implicaba vibraciones excesivas de las placas pero probablemente, los mismos sean una indicación de la presencia de un fenómeno de separación de vórtices en los extremos superior e inferior de las placas. Estos vórtices existen porque cuando existe un cambio en una superficie lindante con una línea de corriente, la situación que se genera para el flujo libre es equivalente a la generación de una nueva superficie lindante. La separación que se produce por el apartamiento de la capa límite de esa superficie lindante, produce superficies de vorticidad que se alejan del extremo de la superficie de acuerdo a lo expresado por Streeter⁽³⁾. Para una placa en las condiciones de flujo que presentan las placas de este EC, el Número de Strouhal puede calcularse como sigue según ha expresado Blevins⁽⁴⁾.

$$S = \frac{f_s t}{U} = \frac{f_s t A}{Q}$$

En esta expresión, S es el Número de Strouhal, t el espesor de la placa, U la velocidad del fluido considerada como velocidad de corriente libre, A es el área efectiva de paso del fluido y Q es el caudal volumétrico de fluido.

Si en la fórmula anterior reemplazamos el valor de la frecuencia de desprendimiento de vórtices por los valores de frecuencia de los picos encontrados, deberíamos encontrar que los valores del Número de Strouhal son similares si los distintos picos están relacionados entre sí.

La Tabla 4 muestra los cambios encontrados en los picos de frecuencia detectados en función de la variación del caudal y los resultados obtenidos para el valor del Número de Strouhal en cada caso.

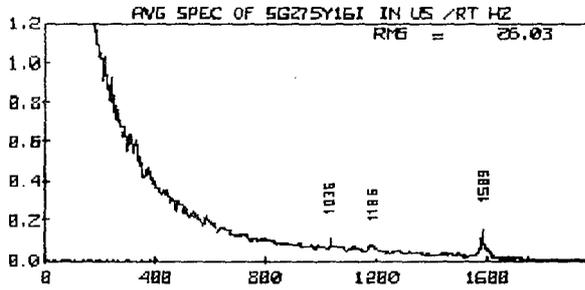


Figura 12: Espectro promediado en el que aparece un pico de frecuencia originado en un fenómeno de desprendimiento de vórtices, obtenido con la señal de un extensómetro y un caudal del 210% del nominal.

| Q (m ³ /h) | U (m/s) | f _s (Hz.) | S |
|-----------------------|---------|----------------------|------|
| 39.6 | 2.76 | 437.5 | 0.24 |
| 46.2 | 3.22 | 476.5 | 0.22 |
| 52.8 | 3.68 | 556 | 0.23 |
| 59.4 | 4.14 | 622 | 0.23 |
| 66.0 | 4.61 | 678 | 0.22 |
| 79.2 | 5.53 | 815.5 | 0.22 |
| 89.1 | 6.22 | 915.5 | 0.22 |
| 99.0 | 6.91 | 975 | 0.21 |
| 105.6 | 7.37 | 1061 | 0.22 |
| 112.2 | 7.83 | 1136.5 | 0.22 |
| 118.8 | 8.29 | 1230.5 | 0.22 |
| 125.4 | 8.75 | 1344 | 0.23 |
| 132.0 | 9.21 | 1380 | 0.22 |
| 138.6 | 10.05 | 1589 | 0.24 |

Tabla 4: Probables frecuencias de desprendimiento de vórtices en placas del elemento combustible en función del caudal de agua y evaluación del Número de Strouhal para cada una.

VI. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Los resultados de los ensayos de laboratorio en aire y en agua estanca permitieron una completa caracterización dinámica de las placas y del EC en su conjunto.

En estos ensayos se obtuvieron las frecuencias naturales del EC y de las placas combustibles del mismo. Además, estas últimas frecuencias naturales obtenidas experimentalmente, presentaron una buena correlación con los resultados de los modelos de las placas realizados por el método de elementos finitos, que tenía a las primeras cinco frecuencias naturales muy próximas entre sí.

Los valores obtenidos para la relación de amortiguamiento para las placas externas del EC fueron mayores que los obtenidos para las placas internas, tanto en los ensayos en aire como en los realizados en agua

estanca. Además, los valores de relación de amortiguamiento que surgieron de los ensayos en agua estanca fueron, como era esperado, mayores que los obtenidos durante los ensayos en aire, debido a la presencia del fluido rodeando las placas.

Estos resultados permitieron calcular los coeficientes de masa asociada para las placas del EC.

Por otra parte un análisis preliminar de los datos que surgen de los ensayos efectuados con circulación de agua permite establecer que los valores de desplazamiento RMS medidos sobre el conjunto del EC y sobre su herramienta de sujeción fueron muy bajos para todo el rango de caudales cubierto.

Asimismo, los valores medidos de deformación RMS en las placas que fueron instrumentadas con extensómetros, también fueron bajos para todos los caudales de agua que se emplearon en los ensayos y para una misma placa, los valores medidos en el extremo inferior de la placa siempre fueron mayores que los medidos en el extremo superior de la misma.

Las inspecciones visuales y dimensionales efectuadas después del ensayo continuo de 10 horas de duración no mostraron evidencia de desgastes o desajustes entre las distintas partes del EC.

En el rango de caudales de agua cubierto por los ensayos realizados, no se encontró evidencia alguna de un incremento brusco en las amplitudes de vibración de las placas combustibles o de un cambio en los espectros obtenidos a partir de las señales de los extensómetros que mostraran el paso de vibraciones con un ancho de banda de frecuencias relativamente amplio a vibraciones en una banda angosta de frecuencias. Teniendo en cuenta estos resultados se puede concluir que las placas del EC no alcanzaron la velocidad del fluido, denominada velocidad crítica, que implica el inicio del fenómeno de inestabilidad fluidoelástica.

Por último, existen ciertas evidencias acerca de la posibilidad de ocurrencia de vibraciones por desprendimiento de vórtices, aunque la amplitud de los picos de frecuencia encontrados no resulta significativa. Estos resultados deben ser analizados con mayor profundidad para confirmar la existencia de este fenómeno.

VII. REFERENCIAS

- 1 - S.S. Chen. "Flow Induced Vibration of Circular Cylinder Structures". 1987, Hemisphere Publishing Corporation, Washington.
- 2 - H. Chung and S.S. Chen. "Hydrodynamic Mass". 1978, Argonne National Laboratory, Technical Memo ANL-CT-78-49.
- 3 - V.L. Streeter. "Handbook of Fluid Dynamics", 1961, Mc. Graw Hill Book Company Inc., New York.
- 4 - R.D. Blevins. "Flow-Induced Vibration", 1977, Van Nostrand Reinhold Company, New York.