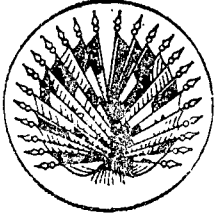


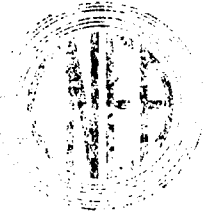
04.78.02

C. N. E. A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
NO 2	AÑO 1978



COMISION INTERAMERICANA DE ENERGIA NUCLEAR Y
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA DE LA REPUBLICA ARGENTINA

**CURSO LATINOAMERICANO DE INGENIERIA NUCLEAR
ORIENTADO A LA CAPACITACION BASICA PARA LA
IMPLEMENTACION DE PROGRAMAS NUCLEOELECTRICOS**



CNEA AC-58/78

INGENIERIA DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

Prof.: Ing. ROBERTO CIRIMELLO

BUENOS AIRES - ARGENTINA

OCTUBRE - 1978

I. DISEÑO DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES

Ing. R. CIRIMELLO.

1 - DESCRIPCIÓN DE EC de potencia.

Los reactores comerciales casi sin excepción usan hoy elementos combustibles compuestos por dióxido de uranio (UO_2) como material combustible y Zircaloy-4 como material de envainado y estructural.

Las denominadas "barras combustibles" son en realidad cápsulas de longitud variada que contienen el material fisiónable.

El material combustible está en la forma de "pastillas" sinterizadas de un diámetro que varía de 9,5 a 14 mm, según el tipo de reactor y de altura similar al diámetro.

La geometría externa de las pastillas de UO_2 varía generalmente según el diseñador en lo que hace a sus caras planas cilíndricas.

Algunos son simplemente con caras planas, otras llevan concavidades y/o chanfles en los bordes en una o ambas caras.

El "encapsulado" se realiza con tubos de Zircaloy que llevan soldado en sus extremos tapones del mismo material.

Estas cápsulas contienen generalmente cientos de pastillas de UO_2 .

En algunos diseños se incluyen elementos internos en las barras combustibles con la finalidad de absorber dilataciones diferenciales, alojar gases de fisión, subdividir la columna de pastillas, etc.

Algunos diseños han incorporado una presurización interna en las cápsulas o barras combustibles y otros un recubrimiento de grafito. Esto tiene la finalidad de prevenir los efectos de la interacción mecánica entre pastilla y vaina.

En la parte exterior del tubo se suelen incorporar apéndices que sirven como espaciadores o patines deslizantes para apoyo entre barras combustibles o entre estos y separadores o canal de refrigeración.

Las barras combustibles se ensamblan en un manojo de cantidad variable de acuerdo al tipo de reactor. La geometría y distancia entre barras combustibles depende también del tipo de reactor y condiciones térmicas y neutrónicas de funcionamiento.

El conjunto de las barras combustibles mantienen su geometría por medio del uso de componentes estructurales tales como separadores, placas extremas y en algunos casos tubos estructurales.

2 - CARACTERÍSTICAS DIFERENCIALES EN FUNCIÓN DEL TIPO DE REACTOR

Dentro de los reactores de uranio enriquecido, llamados también de núcleo abierto, las barras combustibles se ensam-

blan en conjuntos de geometría cuadrada. En los reactores de agua a presión (BWR) el número de barras es de 200 a 260 según se coloquen en arreglos de 15 x 15 o hasta 17 x 17.

Estos ensambles están constituidos por "canastos" formados por dos piezas extremas y 7 ó 8 separadores intermedios unido todo por medio de tubos que son a la vez el alojamiento de las barras de control.

Los EC de reactores de agua en ebullición (BWR) los arreglos son de hasta 7 x 7 BC y las barras de control son externas y en forma de placas en cruz.

La longitud de éstos EC es de aproximadamente 3,6 metros. Las BC no tienen ápndice soldados a sus vainas y el apoyo entre éstas y los separadores se verifica a través de muelles elásticos fijos a los separadores. Las barras están libres de dilatar axialmente.-

Entre los reactores de uranio natural resultan de interés los del tipo de recipiente de presión (PWR) y los de tubo de presión (HWR).

En este caso los EC son similares a los PWR excepto que las barras combustibles están ensambladas en un ordenamiento circular. Esto se debe a que los EC deben entregar su energía térmica al refrigerante dentro de canales y la geometría más conveniente de éstos es la cilíndrica.

En los reactores PWR (Atucha) los EC son verticales de 6 m. de longitud y con 37 posiciones para Barras Combustibles. Una de ellas actualmente es ocupada por un tubo estructural.

En los reactores HWR (CANDU) los canales son horizontales también de aproximadamente 6 m. de longitud pero los EC están subdivididos en manojos de 37 barras de 50 cm. de largo, de tal manera que un canal se completa con 12 de ellos.

3 - ESPECIFICACIONES BASICAS DE MATERIALES -

Si bien teóricamente existe la posibilidad de diseñar un reactor eligiendo entre varios materiales combustibles y estructurales hoy se usan en los reactores comerciales exclusivamente el dióxido de Uranio (UO_2) y el Zircaloy 2 o 4. Además se usan algunos tipos de aceros austeníticos o aleaciones de níquel como complemento en ciertos componentes estructurales.

Esto ha conducido normalizar las especificaciones de los materiales mencionados al menos dentro de rangos estrechos de composiciones y propiedades.

En el polvo de UO_2 existe una composición química tipo la cual implica un contenido de impurezas de 0,9 ppm de boro equivalente en los reactores de uranio natural y 2 ppm en los de Uranio enriquecido.

En lo que hace a las propiedades físicas se contempla

la fluidez, la densidad TAP y lo que es más importante el ensayo de sinterizado.

Con respecto al Zircaloy aparte de los aleantes que ya están fijados para las variantes 2 y 4 se limita el contenido de oxígeno y de impurezas especialmente el Hafnio, principal elemento que está contenido originalmente en los minerales de Zirconio.

En este caso interesa limitar el contenido de impurezas de alta sección de captura neutrónica y aquellas que pueden ser perjudiciales para la corrosión del Zircaloy en agua como los halógenos.

Los aleantes del Zr (Sn, Fe y Cr) tienen la finalidad de formar intermetálicos que finamente precipitados mejoran la resistencia a la corrosión del Zirconio.-

4 - CRITERIOS DE DISEÑO

Existen también ciertos criterios básicos de diseño de carácter general que deben seguirse en el dimensionamiento y especificación de los parámetros de diseño de las barras combustibles.

Dos de ellos están relacionados con el aspecto de la generación y transferencia térmica. Si bien el punto de fusión del UO_2 es elevado ($2800^\circ C$) la alta densidad de potencia generada y la baja conductividad térmica del mismo hacen que la temperatura central sea normalmente muy alta. El límite está impuesto por la temperatura de fusión ya que se produce un aumento de volumen que expulsa normalmente el material fundido provocando la rotura del material de envainado.

El otro límite lo impone la temperatura máxima de trabajo del Zircaloy en agua para prevenir una corrosión acelerada del mismo. Este valor es de $350^\circ C$ aproximadamente.

Desde el punto de vista mecánico y considerando que la meta del diseño es mantener la integridad de la vaina durante todo el tiempo de permanencia en el reactor y en el almacenamiento posterior, debe considerarse la máxima deformación que se espera alcanzará la vaina.

Este valor se limita generalmente al 1 o 1,5 % (sumando todos los efectos que provocan deformaciones plásticas) en términos de la deformación equivalente.

Finalmente, y si bien ya ha sido tratado en una clase anterior, debe tenerse en cuenta el valor máximo del flujo calórico de tal manera de tener un margen seguro respecto del valor crítico o de secado.

5 - REQUERIMIENTOS DE OPERACION

Los mismos dependen esencialmente del tipo de reactor. En particular interesa la forma de recarga de combustible y su manipuleo y el esquema de uso del combustible en el núcleo o

historia de irradiación.

En los reactores de uranio enriquecido, la recarga de combustible se hace cuando se para el reactor y se cambia del orden de un tercio del núcleo, lo cual se verifica cada un año y medio o dos.

En los de uranio natural se requiere una recarga más frecuente porque la disponibilidad de material fisiónable es menor. Por ello se realiza en forma continua sin detener la marcha del reactor.

Esto determina la diferencia entre las características estructurales del ensamble de barras. En el caso de los de uranio enriquecido el conjunto de barra esta montado en un sólido ensamble que permite ser apoyado en su base o pieza inferior.

Esto permite agrupar el combustible en el núcleo sin necesidad de soportes adicionales.

En el caso de los reactores de uranio natural se usan canales de refrigeración en los de recipiente de presión y tubos de presión en los HWR.

Estos canales sirven de apoyo a los elementos combustibles los cuales en virtud de la necesaria economía neutrónica tienen reducido al mínimo necesario los componentes estructurales.

En el caso de los reactores de recarga en potencia se imponen requerimientos mecánicos dimensionales y termohidráulicos adicionales a los que están sometidos los EC en el núcleo.

Fenómenos de desgaste, compresión e impacto son frecuentes en este tipo de reactores.

Se requiere respetar ciertas características dimensionales para que el combustible sea compatible con el sistema de transferencia.

Por otra parte existen exigencias nuevas al someter al combustible a corrientes cruzadas de refrigerante y a cambios de temperatura y presión.

El refrigerante impone al combustible soportar condiciones termohidráulicas (escurrimiento, pérdida de carga, arrastre, vibración) químicas (corrosión, depósito de crud) e hidrostáticas (presión externa, ciclos de presión) severas.

La irradiación neutrónica establece dos requerimientos importantes: la distribución y cambios de potencia y el daño estructural y quemado del material fisiónable.

En lo que hace al primero de ello debe contemplarse en el diseño, la distribución axial y radial en el combustible así como los cambios de potencia.

Desde el punto de vista del daño sobre los materiales los más importantes son:

- generación y liberación de gases de fisión
- hinchado del combustible por productos de fisión retenidos.
- liberación de productos de fisión agresivos hacia la vaina.
- fragilización de la vaina.

Finalmente existen otros condicionamientos impuestos por la necesidad de diseñar combustible apto para soportar transientes que pudieran producirse en hipotéticos accidentes como por ejemplo el de falta total o parcial de refrigeración.

En este caso si bien no se pretende que todo el núcleo resista intacto el evento, se espera que un número elevado de elementos combustibles (usualmente un 70 %) mantenga su integridad. Esto requiere que el material de vaina tenga una adecuada respuesta a la corrosión y sollicitaciones mecánicas a alta temperatura, y que el inventario de gases de fisión no provoque presiones internas inadmisibles en la vaina.

6 - ENSAYOS

Existen dos tipos de ensayos que se efectúan para concretar un diseño determinado. Ellos son: los de caracterización de materiales combustibles y estructurales y los de irradiación y en circuitos hidrodinámicos.

Si bien las especificaciones de materiales están básicamente establecidas como ya se ha dicho, la ruta de fabricación del polvo de UO_2 y pastillas así como de los tubos y otros semiterminados de zircaloy determina variaciones en sus propiedades que deben considerarse.

En lo que hace al polvo de óxido de Uranio, si bien existe la necesidad de un estudio amplio de sus propiedades para su completa caracterización, es el ensayo de sinterización el que determina la aptitud del mismo para la fabricación de pastillas.

En lo que hace a las pastillas de UO_2 se requiere una caracterización fundamentalmente microestructural que determina la estabilidad divisional y liberación de gases y productos de fisión.

Los semiterminados de Zircaloy en especial los tubos para vainas deben ser ensayados para calificar la uniformidad de propiedades en los lotes provistos por los fabricantes.

En lo que hace a los ensayos en circuitos hidrodinámicos y de irradiación están estrechamente vinculados con los requerimientos de operación. En este sentido estos ensayos tienen la finalidad de verificar la aptitud de un diseño para soportar las sollicitaciones termohidráulicas y las derivadas de la historia de irradiación prevista.

Entre los ensayos hidrodinámicos se encuentran los de vibración, desgaste, pérdida de carga y en algunos diseños impacto, resistencia y durabilidad.

Los de irradiación tratan de confirmar fundamentalmente que se verifican los parametros de comportamiento previstos como gases de fisión y deformación de la vaina a potencia constante y que no existen defectos al sometérselos a saltos de potencia.

7 - GARANTIA DE CALIDAD

El plan de garantía de calidad para el combustible nuclear involucra tanto al diseñador y fabricante como a la operación del mismo, por eso se menciona aquí.

En forma general un plan de garantía de calidad consiste por un lado en la verificación del cumplimiento de todos los procedimientos y pasos requeridos para concretar un producto y utilizarlo de acuerdo a lo previsto.

Por otro lado implica la realización de un procedimiento de control de calidad que determinado por el diseñador debe ser cumplido por el fabricante y sujeto a la auditoría del usuario.

El sistema así organizado permite asegurar una razonable confianza en la calidad del combustible, lo cual es requerido no solo para garantizar la disponibilidad sino por razones de seguridad considerando que el combustible es la fuente principal de productos radiactivos.

II. COMPORTAMIENTO Y PERFORMANCE DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES

1 - COMPORTAMIENTO DE BARRAS COMBUSTIBLES DE UO₂ ZIRCALOY

1.1- Comportamiento de los productos de fisión

Considerando su comportamiento químico en el combustible, los productos de fisión pueden ser divididos en varios grupos:

- Los gases nobles Kr y Xe de baja solubilidad y tendencia a aglomerarse en burbujas.
- Los que por su alta presión de vapor tienen alta movilidad: Rb, Cs, Te, Br, I ; los cuales interesan por su reacción con la vaina.
- Los que se pueden separar como fases metálicas, formando intermetálicos con el Uranio: Ru, Rh, Pd.

- Los que de acuerdo a la disponibilidad de oxígeno se separan en fase metálica o de óxidos: Mo y Tc.
- Los que siempre se separan como óxidos: Sr y Ba.
- Las tierras raras que forman óxidos mixtos con la matriz del óxido combustible: Y, Zr y Nb.

Otro aspecto es la migración de los productos de fisión sobre la cual se pueden hacer las siguientes consideraciones:

- Los elementos con alta presión de vapor, es decir óxidos inestables, migran a las zonas frías exteriores de la pastilla.
- Al final de la irradiación, en la parte externa de la pastilla aparece un crecimiento de grano equiaxial - que contienen las fases de productos de fisión oxidados.
- Los precipitados metálicos son encontrados en la zona de grano columnares. Especialmente el Ru puede ser - identificado por autorradiografía, ya que el puede dar, por enfriamiento lento, un enriquecimiento metálico - en el centro.
- Los óxidos de productos de fisión, los cuales forman - óxidos mixtos con la matriz del material combustible, están distribuidos uniformemente en la sección de la pastilla.

El enriquecimiento en productos de fisión en la pared interna de la vaina influye -según su compatibilidad- directamente sobre la performance tecnológica de la barra combustible.

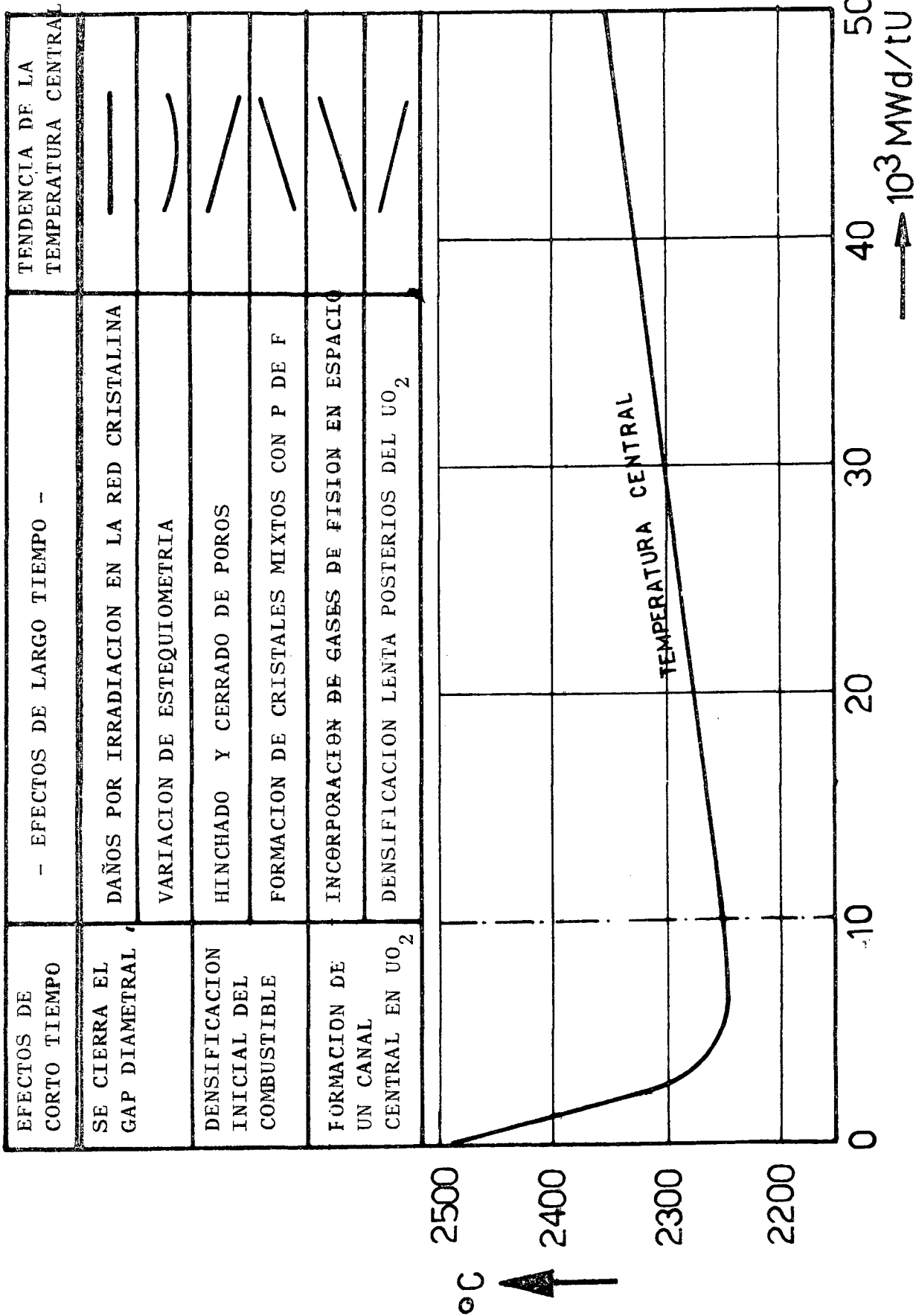
Los fenómenos internos del material combustible tiene por el contrario una más indirecta influencia, siempre que la distribución de temperatura quede determinada con certeza.

1.2 - Cambios estructurales y de las principales propiedades físicas.

De interés especial para los fenómenos internos del material combustible es la influencia del quemado sobre la conductividad y transferencia térmica.

En la fase inicial de la vida de una barra combustible hay tres efectos principales:

- El "gap" pastilla vaina se achica por dilatación térmica y por la formación de fisuras térmicas. Por ello se mejora la transferencia térmica en el "gap".



///

- Comienza a densificarse el material combustible localmente, especialmente por crecimiento de grano en la zona de grano columnar. La disminución de porosidad conduce a un aumento de la conductividad térmica.
- Se forma un canal central que acorta el "camino o espesor" de transferencia térmica. Todos estos efectos conducen a una disminución de la temperatura central en más de 100°C. Los efectos de largo tiempo tienen en conjunto tendencias opuestas, las que además tienen componentes muy diferentes.
- Debido al daño por radiación de la red cristalina se reduce la conductividad térmica. Por el recocido de los defectos a temperaturas superiores a 500°C no son observables efectos especiales.
- La conductividad térmica de óxidos combustibles es máxima para la estequiometría exacta y disminuye cuando se aparta de ella. Por eso al comienzo mejora la conductividad y luego disminuye ya que la estequiometría inicial es ligeramente superior a la exacta. Esta disminuye hacia la exacta aumentando la conductividad y luego al seguir a composiciones hipostequiométrica vuelve a disminuir la conductividad.
- El hinchado del material combustible mejora la transferencia térmica por la presión de contacto pastilla-vaina.
- La formación de óxidos mixtos en la matriz de combustibles está asociada con un desmejoramiento de la conductividad, lo cual no es afectado por el pequeño volumen de productos de fisión metálicos que favorecerían la conductividad térmica.
- El continuo aumento de los gases de fisión como componente del gas de llenado tiene un efecto negativo.

En resumen, seguido a una brusca caída de la temperatura central sigue una lenta subida como muestra la figura, la cual debe ser tomada como cualitativa.

Otro aspecto importante en el comportamiento del material combustible es la liberación de gases de fisión, el cual aumenta con el quemado. Sin embargo está estrechamente relacionada con la distribución de temperatura discutida antes.

1.3- Cambio de Propiedades mecánicas de la vaina

Las aleaciones de Zirconio son afectadas de dos maneras:

///..

///

- Daño por irradiación.
- Formación de hidruros por absorción de Hidrógeno.

El primero de ellos, que se verifica entre 300 y 350°C conduce a:

- Elevación del límite de proporcionalidad (resistencia mecánica).
- Disminución de la deformación a rotura (ductilidad).

El segundo de ellos también conduce a fragilización. El hidrógeno (o deuterio) proviene de la reacción H_2O/Zr ó D_2O/Zr , o de la radiólisis de agua. El efecto sobre las propiedades mecánicas de la precipitación de hidruros depende de su orientación y la textura del material.

La corrosión de los materiales de Zircaloy especialmente de la vaina a temperatura de trabajo y bajo irradiación no es un problema mientras la química del refrigerante está controlada, y solo debe considerarse la disminución de espesor de pared en los reactores de uranio enriquecido.

1.4- Transferencia térmica pastilla-vaina.

Deben considerarse tres casos:

- a) Cuando el diámetro de la pastilla es menor en 80mm. que el diámetro interno de la vaina.
- b) Cuando la diferencia de diámetro está entre 0 80mm.
- c) Cuando esta diferencia o "gap diametral" es menor que cero o sea que hay una presión de contacto positiva con dilatación de la vaina.

Para cada uno de los casos considerados se asume un valor de la conductancia que permite determinar la temperatura central o el régimen de transferencia térmica.

1.5- Interacción combustible-vaina

Debido que el UO_2 se expande más que el Zircaloy, está a mayor temperatura, se fisura y se hincha las pastillas combustibles interaccionan con la vaina.

La magnitud de esta interacción depende del "gap diametral", la geometría de las pastillas, la potencia específica, la velocidad de crecimiento de potencia y las propiedades de la vaina.

///..

///

El estado de tensiones y deformaciones es muy complejo, en las condiciones de interacción, y tiene usualmente una multiaxialidad cambiante con el agravante - de que las deformaciones pueden estar concentradas sobre pequeñas longitudes.

La deformación diametral de la vaina debido a la interacción pellet-vaina puede ser causada por la expansión térmica uniforme de las pastillas, por el efecto de reloj de arena que toman las pastillas, y por el hinchado debido a productos de fisión.

La deformación uniforme de la vaina es igual a la expansión del UO_2 al que se le resta el "gap" inicial, la expansión térmica de la vaina y la expansión elástica de la vaina.

Sin embargo depende de:

- Potencia específica y quemado.
- Diferencia diametral pastilla-vaina.
- Parámetros de la pastilla.
- Resistencia de la vaina.
- Velocidad del cambio de potencia.

Para valores de potencias específicas usuales y "gap" diametrales del 0,5% del diámetro la deformación uniforme es del orden de 0,5%.

Experiencia de irradiación muestran que el efecto del gap diametral inicial puede desaparecer por el croqueado y acomodación de las pastillas dentro de la vaina.

La forma de las pastillas tienen un efecto importante sobre la dilatación e interacción combustible-vaina.

Pastillas de relación $\frac{\text{longitud}}{\text{diámetro}} = 0,5$ con concavidades en sus caras planas y chanfles en los bordes dan la mitad de deformación que pastillas de $\frac{L}{D} = 1$. No se observa lo mismo con pastillas de caras planas.

Asimismo para densidades bajas 90-92% D.T. la deformación se reduce comparando con 95-97% de densidad teórica.

Cuando se pasa de vainas recocidas a relevadas detenciones (mayor resistencia) la deformación se reduce. Esto se debe a que la pastilla se ve sometida a mayores tensiones circunferenciales lo que aumenta la fluencia o creep.

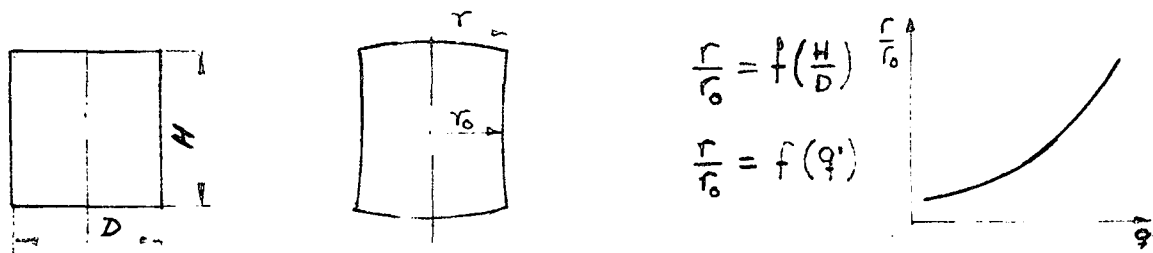
///..

////

Reduciendo la velocidad de aumento de potencia se reduce la deformación porque disminuye la temperatura de plastificación del UO_2 .

Las deformaciones Localizadas se deben a que las pastillas toman la forma de un reloj de arena. Esto se debe a que se trata de un cilindro finito y elástico en un gradiente de temperatura radial.

Las figuras que siguen ayudan a comprender este fenómeno:



En el caso de una columna de pastillas esto conduce al efecto de "cana de bamboo"

La altura de los "nudos" o "lomos" que se forman en la vaina llegan a ser de hasta 50mm. Es proporcional a la potencia, más grandes en las pastillas con concavidades que con caras planas y mayores en las pastillas con relación $\frac{H}{D} > 1$.

Esto provoca deformaciones localizadas que están por encima de las determinadas como uniformes.

Otro aspecto de importancia es la apertura de fisuras en la cara de la pastilla y que por el rosamiento que existe entre ella y la vaina provoca tensiones localizadas muy altas, las cuales, asociadas a la presencia de agentes que fragilizan la vaina tales como el yodo y el Cs, provocan fallas por corrosión bajo tensiones.

Finalmente existen ciertas restricciones para los parámetros de operación cuando se opera a potencias a las cuales la interacción es importante. Esos parámetros son:

- Velocidad de incremento de potencia.
- Máximo incremento de potencia permitido.
- Potencia máxima de irradiación.

2 - COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES

2.1- Vibración inducida por el flujo de refrigerante

///..

///

Todas las barras combustibles, vibran por efecto de la circulación del refrigerante. El modo de vibración de interés es el lateral, cuando una barra sostenida en sus extremos vibra como una varilla flexible.

La fuerza impulsora o excitación, es aportada por el refrigerante y es debida a fuerzas variables aleatoriamente con el tiempo resultantes de la turbulencia en el fluido. Hay también fuerzas de amortiguación las cuales disipan la energía, fuerzas inerciales y de recuperación elásticas.

En flujo de una fase las excitaciones (fluctuaciones de presión) se deben al movimiento lateral de remolinos, pero en dos fases (agua-vapor) la causa es más compleja.

En el contexto de la durabilidad de los Elementos Combustibles el parámetro de interés es la amplitud de vibración.

Esta depende de muchos factores pero los de mayor importancia son rigidez de las barras combustibles, el número y tipos de soportes (separadores) y la velocidad del fluido.

No solo las barras combustibles pueden vibrar sino el ensamble de ellos en conjunto y provocar alteraciones en barras de control, canales de refrigeración o en elementos combustibles vecinos.

Mientras la frecuencia característica de las barras combustibles está entre 50 y 150 Hz, la de elementos combustibles o ensambles es de 2,5 a 20 Hz.

Los efectos más importantes de este fenómeno son:

- Corrosión por fricción de partes en contacto.
- Fatiga por flexión alternada en las Barras Combustibles.

2.2- Otros efectos

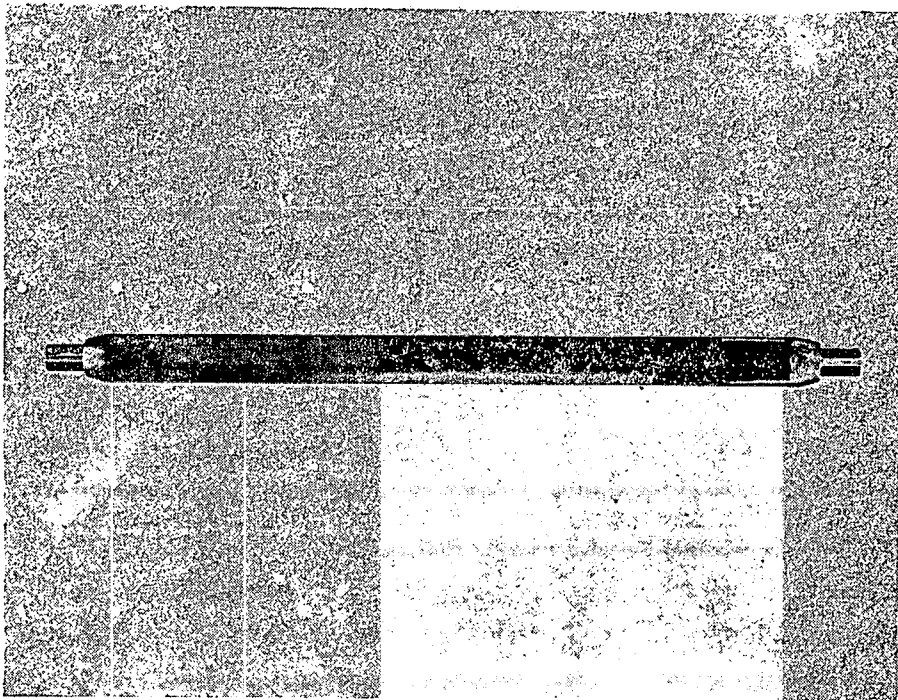
Existen otros efectos de menor importancia o controlables en los elementos combustibles o ensambles. Ellos son:

- Crecimiento axial diferencial de barras combustibles.
- Arqueado de barras combustibles por efecto de gradientes de flujo neutrónico, interacción con separadores o restricciones de los extremos.

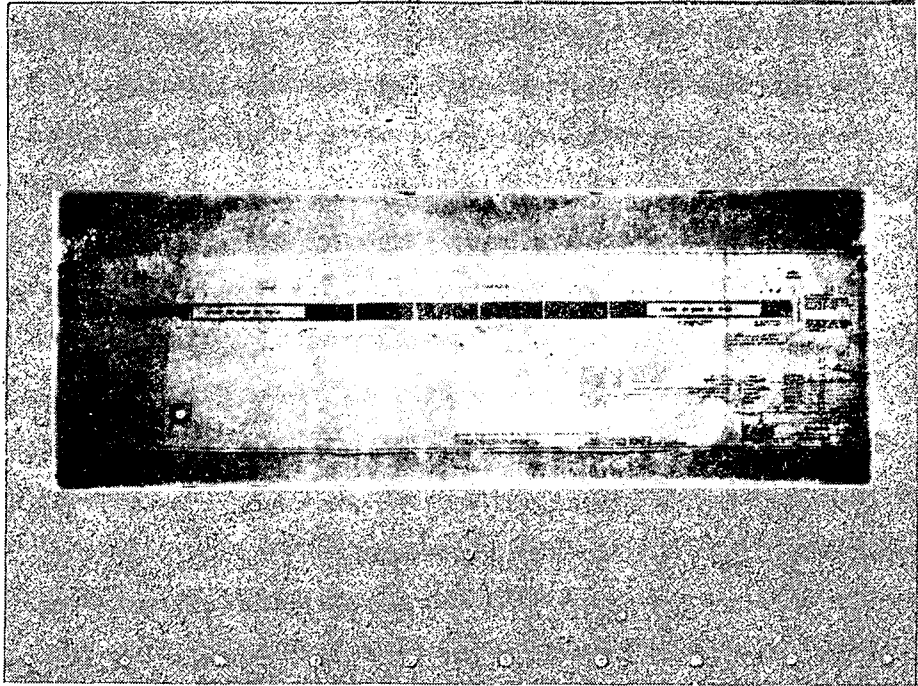
///...



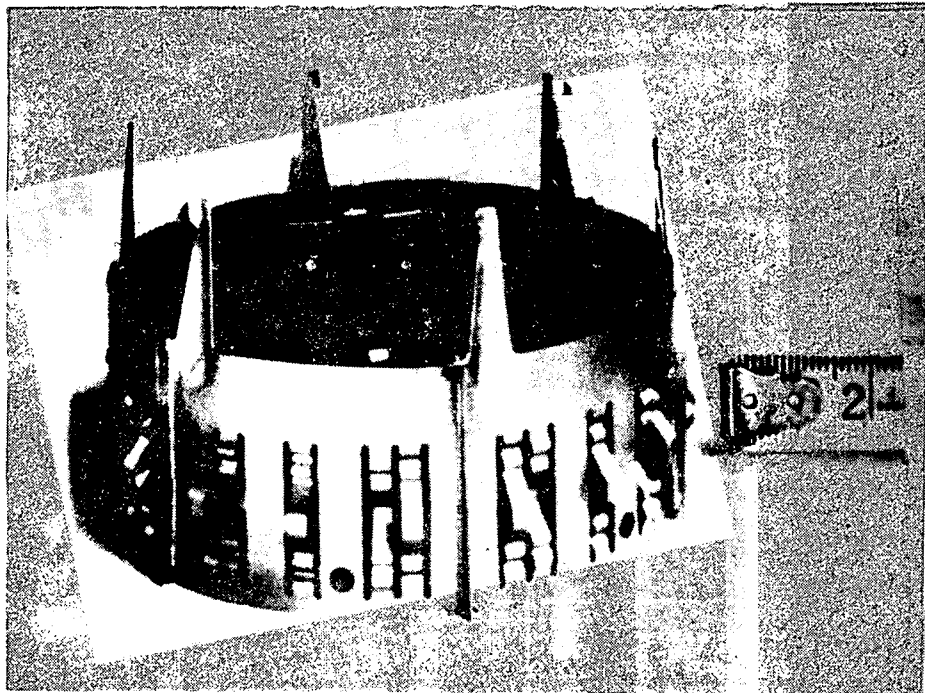
PASTILLAS COMBUSTIBLES DE OXIDO
DE URANIO



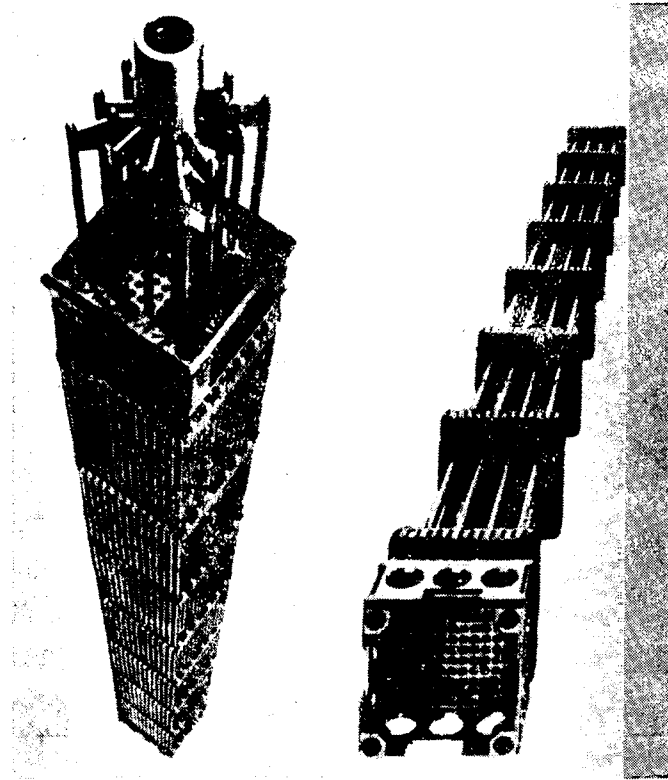
CAPSULA COMBUSTIBLE CORTADA PARA
MOSTRAR LA PASTILLA COMBUSTIBLE
DE OXIDO DE URANIO EN SU INTERIOR



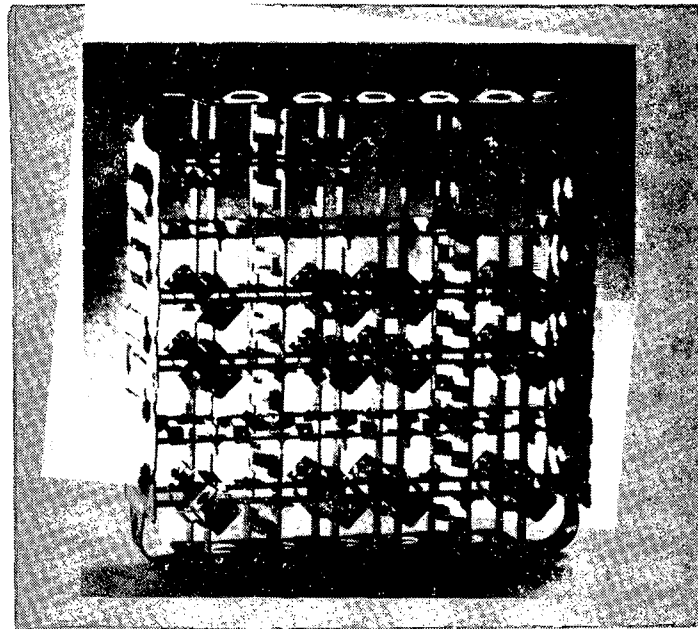
BARRA COMBUSTIBLE ATUCHA



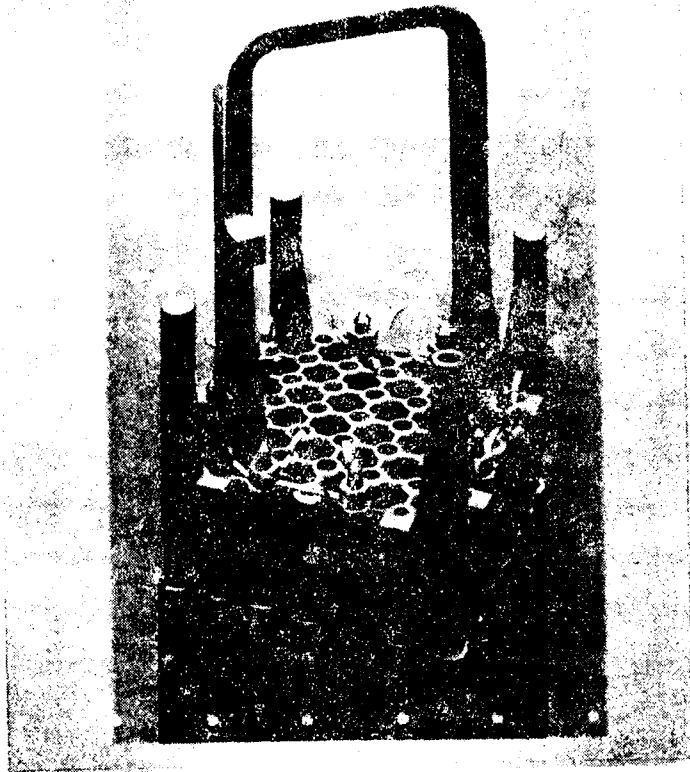
SEPARADOR DE AJUSTE ELASTICO



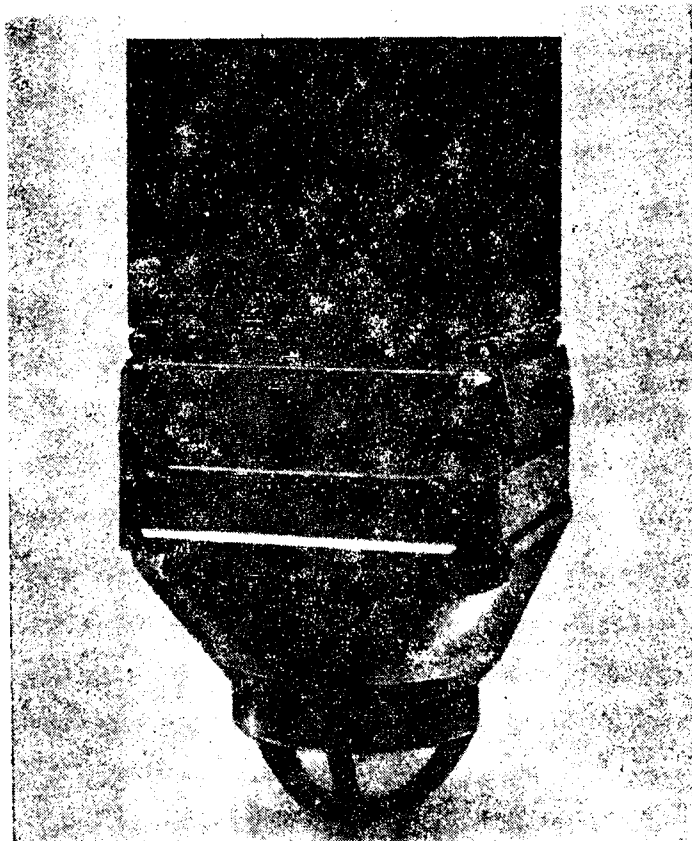
ELEMENTO COMBUSTIBLE DE REACTORES DE AGUA A PRESION Y URANIO ENRIQUECIDO



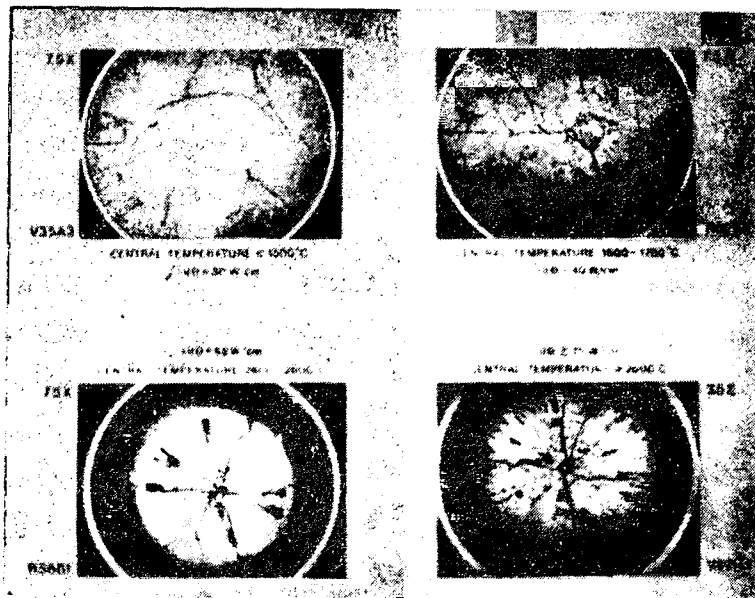
SEPARADOR ELASTICO DE UN ELEMENTO COMBUSTIBLE DE REACTORES DE AGUA EN EBULLICION Y URANIO ENRIQUECIDO



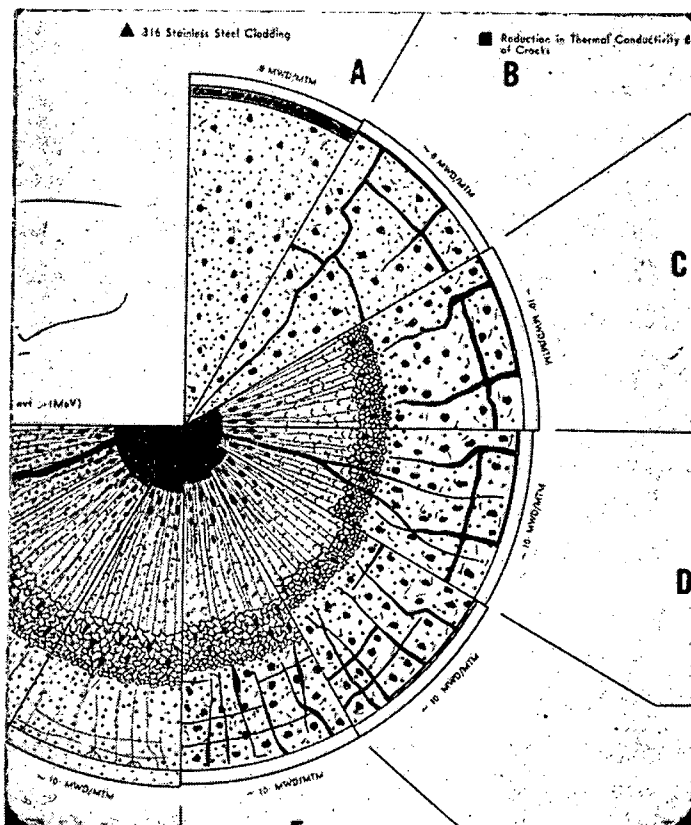
PLACA SUPERIOR Y CANCANO DE UN
ELEMENTO COMBUSTIBLE TIPO BWR



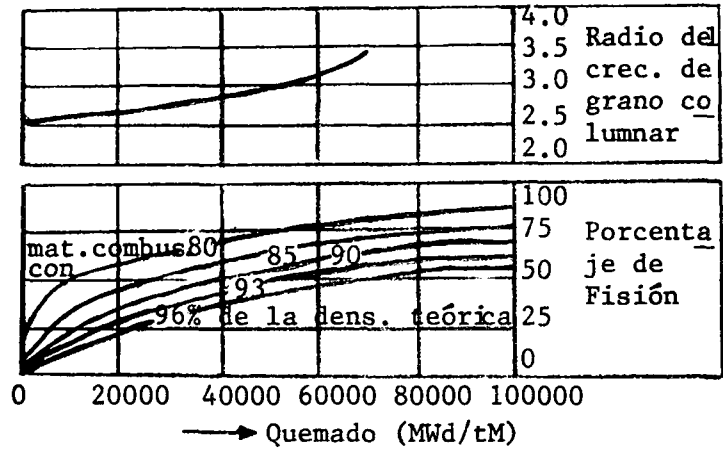
PLACA INFERIOR Y BOQUILLA DE UN
ELEMENTO COMBUSTIBLE TIPO BWR



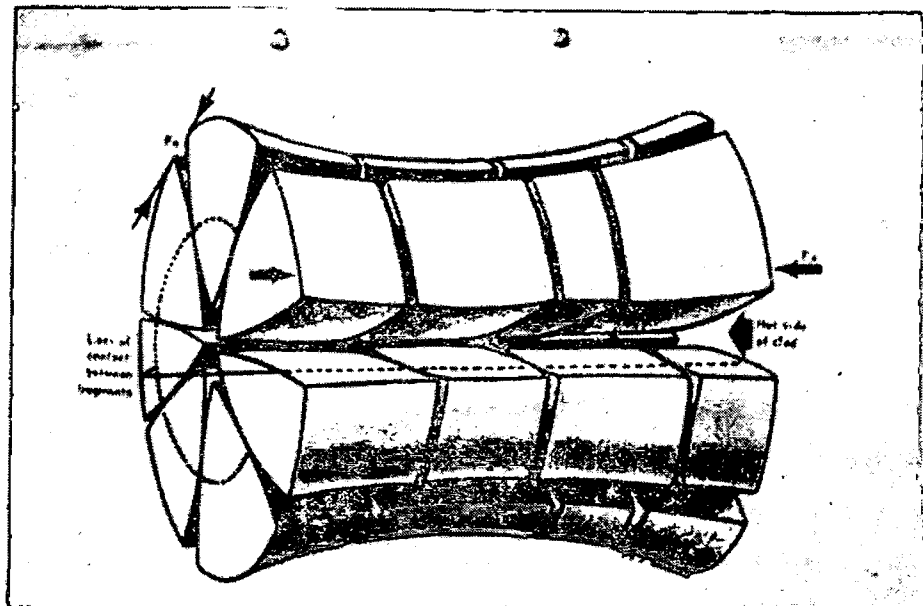
CORTES TRANSVERSALES DE PASTILLAS
COMBUSTIBLES DE OXIDO DE URANIO
IRRADIADAS A DIFERENTES POTENCIAS



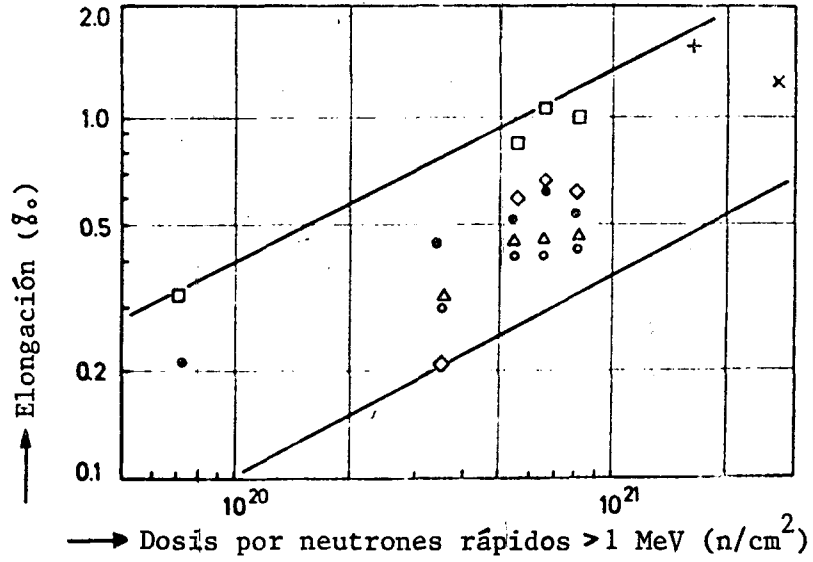
ESQUEMA DE LAS CARACTERISTICAS MI-
CROESTRUCTURALES DE UNA PASTILLA
COMBUSTIBLE A DIFERENTES POTENCIAS
Y QUEMADOS



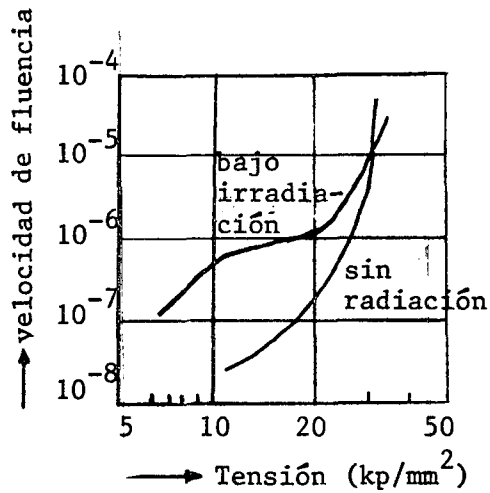
RADIO DEL CRECIMIENTO DE GRANO COLUMNAR Y LIBERACION DE GASES DE FISION EN FUNCION DEL QUEMADO



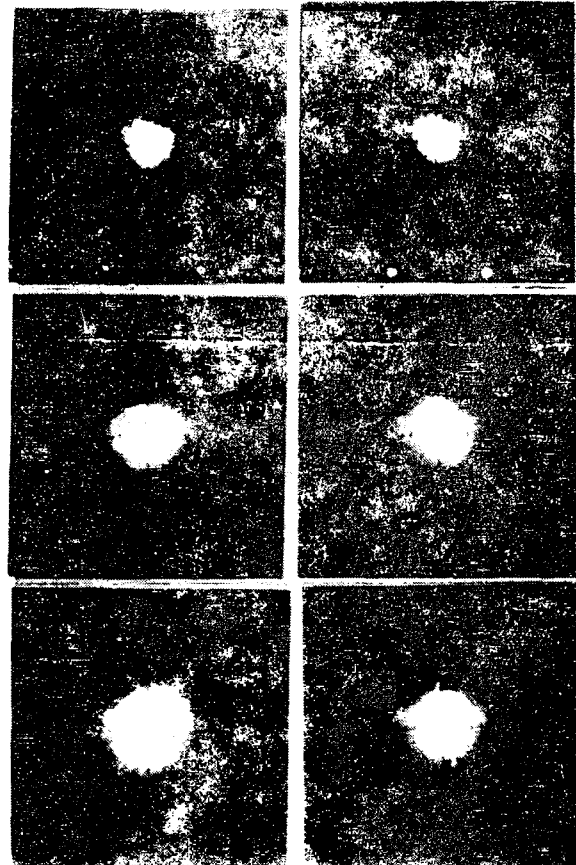
ESQUEMA DE LA FORMA Y FISURAS QUE PRESENTA UNA PASTILLA COMBUSTIBLE DURANTE IRRADIACION



AUMENTO DE LONGITUD DE LOS TUBOS DE ZIRCALOY EN FUNCION DE LA DOSIS NEUTRONICA



INFLUENCIA DE LA IRRADIACION SOBRE EL CREEP DEL ZIRCALOY



FIGURAS OBTENIDAS EN UN OSCILOSCOPIO
DE LA VIBRACION TRANSVERSAL DE BARRAS
COMBUSTIBLES POR EFECTO DEL FLUJO DE
REFRIGERANTE