

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

***PERFIL DE TEMPERATURAS EN  $UO_2$***

**T E S I S**

Que para obtener el título de

**F I S I C O**

p r e s e n t a

**RICARDO ARTURO ALAYOLA ROSAS**

**México, D. F.**

**1973**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**

**Tesis Digitales**

**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**

**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mis padres:

J.F. Raúl A Alayola Duarte

Pilar Rosas de Alayola

A mis hermanos

Quiero agradecer sinceramente al Doctor Ricardo Gómez Ramírez el haber dirigido este trabajo y la colaboración prestada en todo momento así como la amistad y confianza depositadas en mí.

Agradezco al Instituto Nacional de Energía Nuclear la beca que se me otorgó durante el desarrollo de este trabajo.

## INTRODUCTION

El objetivo del presente estudio, es predecir el perfil de temperaturas en el combustible nuclear durante la operación de un reactor. La importancia de obtener este perfil radica en que por un lado, no es conveniente que la temperatura sobrepase el punto de fusión del combustible pues éste, al derretirse, se concentraría en la parte inferior provocando un desequilibrio en la cantidad de calor producida a distintas altura de la barra y por otra parte, la temperatura de la superficie debe alcanzar distintos valores dependiendo del diseño!

El problema es muy particular pues tiene características críticas que hacen difícil su operación y además, está sujeto a fuertes gradientes y cambios de temperatura.

Para una mejor visualización de cómo se puede observar y aún predecir el comportamiento del combustible, presentaremos una descripción somera del sistema en donde ocurren estos fenómenos, un reactor.

Un reactor como cualquier máquina, tiene como objetivo transformar energía de una forma a otra. Los diseños suelen ser variados pero todos tienen partes comunes que son básicas a su funcionamiento.

En la figura 1, tenemos un ejemplo clásico de un reactor, en él se ilustran las partes principales.

Estas son:

- A) Un núcleo de combustible
- B) Un moderador que reduce la velocidad de los neutrones y ayuda así al proceso de fisión
- C) Un sistema de control para regular el número de neutrones libres, regulando así la fisión
- D) Un medio de extraer el calor generado en el núcleo
- E) Un blindaje protector contra radiaciones

Describamos ahora cada una de estas partes.

A) El combustible debe ser un material que se fisione fácilmente al ser bombardeado con neutrones.

La única sustancia que en su estado natural es fácilmente fisiónable por neutrones lentos, es el  $\text{UO}_{235}$  que es un isótopo del U-238 y que en su estado natural se encuentra en una proporción del 1%. El U-238 se le llama material fértil porque puede transformarse en otra sustancia llamada plutonio la cual es fisiónable.

Conforme se va irradiando el combustible durante la operación del reactor, los átomos del material fisiónable se van consumiendo pero al mismo tiempo,

el material fértil va produciendo átomos fisiónables.<sup>3</sup>

La fisión del núcleo del U-235 libera una energía de aproximadamente 200 MeV y dos o tres neutrones por núcleo.

Esta energía se distribuye así:

|                                                               |         |
|---------------------------------------------------------------|---------|
| Energía cinética de los productos de fisión                   | 168 MeV |
| Energía cinética de los neutrones de fisión                   | 5 MeV   |
| Energía de los rayos gamma                                    | 5 MeV   |
| Partículas beta del decaimiento de los productos de la fisión | 6 MeV   |
| Rayos gamma del decaimiento de los productos de la fisión     | 6 MeV   |
| Neutrinos del decaimiento de los productos de la fisión       | 10 MeV  |

B) El moderador.- Los neutrones liberados en una reacción en cadena, se mueven a grandes velocidades, sin embargo, son los neutrones de baja velocidad los que producen fisión más efectivamente por lo que se necesita un material que pueda frenar los neutrones rápidamente sin absorberlos. A este material se le da el nombre de moderador y como la masa de un neutrón es casi la de un átomo de hidrógeno, el moderador podrá contener hidrógeno u

otros átomos livianos.

C) Sistemas de control ( Regulación).-- La mayoría de los reactores nucleares se controla regulando la cantidad de neutrones presentes en el núcleo del reactor. Esto se logra usando sustancias como el Bario o el Cadmio que poseen altos coeficientes de absorción neutrónica.

Ya hemos dicho que cada átomo de combustible que se fisiona emite o libera dos o tres neutrones. Estos quedan libres por un tiempo aproximado de  $10^{-7}$  segundos. Por lo tanto, el más mínimo aumento en la población neutrónica, entre generaciones, podría multiplicar la velocidad de fisiones cientos de veces por segundo.

Afortunadamente, algunos neutrones no se desprenden instantáneamente. Manteniendo la cantidad de neutrones en el sistema, a un nivel tal que siempre haya necesidad de estos neutrones retardados para sostener la reacción en cadena, el aumento en la velocidad de la fisión es de sólo el 1% o 2% por segundo.

Un aspecto de la operación de reactores que merece mención es la pérdida de reactividad.

Hemos visto que a medida que el combustible se consume, se van formando productos que al acumularse reducen la actividad del combustible.

Para compensar este efecto, es necesario sobrecargar el reactor con más combustible del mínimo necesario para lograr el inicio de la reacción.

Este combustible extra, provee el exeso de reactividad asegurando así la continuidad de la reacción.

D) El refrigerante.- La mayoría de los reactores vienen equipados con un sistema de circulación forzada. Existe al presente una gran variedad de refrigerantes. Entre los gases, merecen mención el aire, el helio y el dióxido de carbono. Entre los líquidos el agua ordinaria, el agua pesada y algunos compuestos orgánicos y por último, algunos metales líquidos como el sodio y el litio.

En algunos reactores el refrigerante sirve además de moderador mientras que en otros, el refrigerante y el moderador vienen separados.

Los reactores usados en investigación funcionan por lo regular a temperaturas relativamente bajas (a menos de 200 grados C ) mientras que los

de potencia y los de propulsión funcionan a temperaturas relativamente elevadas (sobre 500 grados C) para facilitar así la conversión de rendimiento calorífico a energía eléctrica o a fuerza motriz

E) Blindaje contra radiaciones .- La parte de energía de la fisión no se transforma en calor inmediatamente sino que se transforma en penetrantes radiaciones atómicas de modo que el reactor debe estar blindado. Hay dos clases de blindajes, el térmico y el biológico. El térmico se usa como protección del tanque principal en los reactores de alta potencia en tanto que el biológico es el que protege al personal contra las radiaciones.

El blindaje térmico consiste usualmente de un forro de acero y el blindaje biológico es casi siempre de un armazón de hormigón de varios pies de ancho

En cuanto al uso de reactores, tenemos que entre los más importantes se encuentran:

- a) Reactores de investigación y prueba de materiales.
- b) Reactores de producción
- c) Reactores para generar energía eléctrica
- d) Reactores proveedores de calor para procesos industriales

e) reactores para la propulsión de barcos

f) Reactores para aplicaciones en el espacio

Daremos los usos principales para el reactor de investigación por su obvia importancia para la ciencia.

El reactor de investigación es en realidad la única fuente verdaderamente versátil en la producción de radiaciones atómicas para propósitos experimentales. Como ejemplo de las adaptaciones que éstos reactores tienen en la ciencia, podemos citar los siguientes casos:

a) En física nuclear, para el estudio de reacciones nucleares, irradiando muestras de diversos materiales.

b) En física del estado sólido, en la determinación de la estructura del cristal de materiales por medio de la difracción de electrones.

c) en química de la radiación por el estudio de las propiedades de algunos materiales y en la variación de las reacciones químicas sometidas a irradiación o en la identificación del índice de impurezas en materiales a base de análisis por activación.

d) en biología por la inducción de mutaciones gené-

ticas en las plantas, irradiando la semilla.

e) En medicina , en el tratamiento experimental de ciertos cánceres del cerebro por el método de terapia por captura neutrónica.

f) En producción de radio isótopos para el uso en los laboratorios.

## CAPÍTULO 1

En el presente capítulo, describiremos cualitativamente el fenómeno que nos interesa. A un apilamiento cilíndrico de pastillas de  $\text{UO}_2$  sinterizado, se le aplica un flujo de neutrones que producen fisiones en el  $\text{UO}_2$  con liberación de energía en el proceso. Las fisiones ocurren en todo el volumen del combustible. Esta liberación de energía en el combustible produce un aumento en la temperatura. Dado el gran número de fisiones que se producen en la unidad de tiempo, la temperatura sube en pocos minutos a temperaturas del orden de  $2.5 \times 10^3$  grados centígrados en el centro de la pastilla. Durante el proceso se produce una distribución radial de temperaturas que disminuye a medida que la distancia al centro aumenta. Esta distribución de temperaturas se produce en la siguiente forma: se inician los procesos de fisión en todo el combustible, todas las fisiones que tengan lugar en las proximidades de la periferia, disipan su calor en el medio ambiente que rodea al combustible esto es, la vaina y el refrigerante.

En las proximidades del centro, no hay forma rápida de disipar el calor pues las diferenciales

de volumen próximas al punto donde se produjo la fisión, también están a una temperatura elevada.

Aplicando el razonamiento anterior a cada uno de los puntos del  $\text{UO}_2$ , se deduce que la temperatura aumentará a medida que nos situemos más cerca del centro. El gradiente así formado, es bastante grande ( típicamente del orden de  $10^3$  grados centígrados por centímetro) debido a que en la superficie exterior del cilindro se hace circular un enfriador que disipa el calor rápidamente. Este aumento y distribución de temperaturas tiene efectos en la macro y en la microestructura que se manifiesta en la siguiente forma.

Al iniciarse el incremento en la temperatura, y conforme se va aumentando, el  $\text{UO}_2$  se dilata de acuerdo a su coeficiente de expansión volumétrica y como éste se encuentra envainado, la vaina se opone presionando al combustible produciendo esfuerzos internos que causan fisuras. Afortunadamente, estas fisuras producen poco cambio en la conductividad.

Después viene un período en el que se alcanza un equilibrio térmico y se establece una distribu-

ción estacionaria de temperaturas.

Este perfil de temperaturas va produciendo nuevas modificaciones en la microestructura que dependen de la temperatura local, del gradiente, del tiempo y de otros factores que serán detallados después. De acuerdo a esta dependencia, se producen zonas cilíndricas cuya estructura presenta las siguientes características.

- a) La estructura de la parte exterior permanece igual que antes de la irradiación.
- b) Una región anular externa en la cual, el grano crece dependiendo del tiempo, temperatura, impurezas gradientes de tensión, estequiometría y radiación principalmente.
- c) Una región circular contigua en la cual el grano crece más rápidamente en la dirección radial formando una zona columnar.
- d) Una región anular interna en la cual se observa crecimiento de grano equiaxial pero con abundante porosidad.
- e) La parte central queda hueca.

Una posible explicación a ésta estructura es la siguiente:

En la zona a), dado que la temperatura no sube lo suficiente, la estructura queda como antes de la irradiación.

En la zona b), se produce un crecimiento de grano debido a que en este rango de temperaturas, se dispone de energía suficiente para alcanzar la llamada "energía de activación" para crecimiento de grano.

En cuanto a la zona c), existen varios factores que influyen en su aparición y crecimiento. Se consideran dos mecanismos importantes, el de evaporación-condensación y el de migración de fronteras. En ambos casos hay una temperatura mínima requerida. En el primer caso, se supone la existencia de poros originados durante la sinterización. En estos poros las paredes internas se encuentran a temperaturas distintas, la parte más caliente es la más cercana al centro de la pastilla, por lo tanto, los átomos se evaporan más fácilmente ahí que los de la parte más fría. Estos átomos en forma de vapor se depositan con mayor facilidad en la parte más fría produciendo así un corrimiento neto del poro de la parte fría a la parte caliente.

Los átomos que se depositan en la parte más fría, lo hacen acomodándose de modo que la energía libre de la estructura formada sea la menor posible produciendo en consecuencia una estructura cristalina.

Esta estructura, tiene la propiedad de tener una conductividad térmica bastante mayor que la que corresponde a un policristal.

En cuanto a las zonas d) y e), cabe señalar que si el gradiente no es lo suficientemente pronunciado, la fusión central no se producirá pues la temperatura central no diferirá lo suficiente de la temperatura superficial. En consecuencia, la estructura mencionada en d), no aparecerá. En éste caso, es de esperarse que el grano columnar se prolongue y colapse en el centro de la pastilla creando un hueco. Este hueco, estará formado, obviamente por la migración de poros.

En el caso de que el gradiente sea lo suficientemente fuerte como para que haya fusión central, el grano columnar que se forma a su alrededor producirá, con su mayor conductividad una más rápida disipación de calor con lo cual tenderá a soldificar

la parte exterior de la zona fundida. Este proceso, presumiblemente alcanza una condición de equilibrio esto es, durante la operación habrá una zona fundida fronteriza con el grano columnar.

Ahora, cuando se apaga el reactor, se deja de producir calor y el que se halla en la zona fundida se ve disipado rápidamente a través del grano columnar. Esta disipación provoca una rápida solidificación de la zona fundida produciendo así granos equiaxiales con una porosidad grande que hereda del crecimiento previo del grano columnar.

El otro mecanismo mediante el cual puede crecer el grano columnar es el de migración de fronteras. En éste, el grano más caliente cede con más facilidad sus átomos al grano más frío. Esta cesión se produce de tal forma que los átomos se arreglan en la estructura cristalina de mínima energía libre.

Con el tiempo, el grano frío va creciendo hacia el centro esto es, hacia la parte más caliente.

En la realidad, es altamente probable que sucedan los dos mecanismos al mismo tiempo pero el predominio de uno de ellos dependerá de factores tales como la densidad del material ó del tiempo

pasado desde el inicio de la migración de poros.

Vale la pena hacer notar que en la predicción del perfil de temperaturas, se dispone de dos métodos principales a seguir, uno es la utilización de termopares y con ellos obtener medidas directas de la temperatura. Desafortunadamente, hay mucha limitación tecnológica en su uso. (Ver Apéndice III) El otro método es estudiando los cambios estructurales y su relación con la temperatura.

## CAPITULO II

Crecimiento de grano.- En un policristal, las fronteras entre cristal y cristal son lugares de mal acomodamiento de átomos. En éstas zonas, la energía libre por unidad de volumen, es mayor que en el interior de los cristales. Si al policristal le quitamos energía en forma apropiada, las fronteras tienden a disminuir su área con la consiguiente disminución en el número de granos.

Cuando disminuye el número de granos, como el volumen es el mismo, cada grano aumenta su tamaño. Además, como el crecimiento de grano depende de la energía de las fronteras, se dice que ésta energía es la fuerza impulsora que hace crecer el grano.

Para entender el mecanismo de crecimiento de grano, recurriremos al caso del crecimiento de las burbujas de jabón que nos ofrecen un modelo simplificado pero similar al crecimiento de grano en los metales<sup>4</sup>.

Consideremos primero una burbuja de jabón totalmente esférica; aquí, existe una diferencia de presiones entre el medio externo e interno de la burbuja debido a que la tensión superficial aumenta la presión interna. Esta diferencia está dada por

la fórmula  $\Delta p = \frac{2\sigma}{r}$  donde  $\sigma$  es la tensión superficial y  $r$  es el radio.

Debido a ésta diferencia de presiones, hay una difusión de gas a través de las paredes con un flujo neto hacia el exterior de modo que las paredes tienen un movimiento hacia el centro de curvatura con el consiguiente empequeñecimiento de la burbuja.

Analicemos ahora, el caso de la espuma de jabón. Aquí, debido a que todas las burbujas están juntas, se presentarán los siguientes casos:

a) Si dos burbujas vecinas tienen la misma presión, sus paredes formarán un plano en los puntos de coincidencia.

b) Si la presión es distinta, la pared quedará cóncava con respecto a la burbuja de presión baja y convexa con respecto a la burbuja de presión alta. Como consecuencia de ésta diferencia de presiones, se produce difusión gaseosa desde la burbuja de pared convexa hacia la burbuja de pared cóncava con el consiguiente empequeñecimiento de la burbuja de presión alta y crecimiento de la burbuja de presión baja.

Para encontrar la forma en que las burbujas

de la espuma crecen en tamaño, tomemos un arreglo bidimensional formado por burbujas comprendidas entre dos secciones de vidrio paralelas. La figura 2 presenta un arreglo de este tipo. El número de la esquina inferior derecha de cada sección de la figura, muestra el número de minutos pasados desde que se detuvo el proceso de agitación que produjo la espuma.

En la figura 3 se muestra una celda de tres lados en dos dimensiones. Nótese que para mantener el ángulo de 120 grados requerido cuando se encuentran tres superficies con tensiones superficiales idénticas las paredes se ven obligadas a tomar una curvatura pronunciada.

En éste caso y de acuerdo a la fórmula (1), es de esperarse que la pared emigre y la célula desaparezca. Esto es precisamente lo que ocurre en la figura 2. Una observación más detallada de la figura 2 nos muestra que las celdas con menos de 6 lados, son primordialmente convexas hacia sus centros en tanto que las que tienen más de 6 lados son cóncavas hacia sus centros.

La diferencia asociada a ésta concavidad hace

esperar que las celdas con menos de 6 lados tiendan a disminuir su tamaño y eventualmente a desaparecer.

La figura 2 muestra que las células de 4 y 5 lados, primero disminuyen su número de lados y luego desaparecen.

Una forma de explicarse cómo varía el número de lados viene esquematizado en la figura 4. Se advierte que dada la curvatura de los límites que separan B y D de A y C respectivamente, las celdas B y D decrecen en tanto que las celdas A y C aumentan con la consecuente pérdida de un lado para las celdas A y C. Una consecuencia inmediata es que con el tiempo, mientras el número de celdas disminuye, el diámetro promedio aumenta.

Ley de crecimiento de grano.- Como dijimos anteriormente, la curvatura de las paredes depende de la diferencia de presión entre los dos medios. La difusión del gas de la curvatura; el tamaño de las celdas es función de la difusión de gas, por lo tanto, la curvatura será un factor a considerar en la velocidad del crecimiento de las celdas.

Supongamos que la conexión está dada en la forma  $\frac{dp}{dt} = k$  donde  $D$  = diámetro,  $t$  = tiempo,  $k$  = constante

de proporcionalidad y  $c$  = curvatura.

Supongamos además, que la curvatura de la célula promedio es inversamente proporcional al diámetro, esto es,  $\frac{k}{c} = kc$ . Ahora, sustituyendo en la

ecuación, tendremos  $\frac{dD}{dt} = \frac{k}{D}$ . Integrando ahora:

$$\int_{D_0}^D D dD = \int_{t_0}^t k dt \quad \text{o sea, } D^2 - D_0^2 = k(t - t_0)$$

donde  $D_0$  = tamaño de grano al tiempo  $t_0$ .

Consideremos ahora que  $D_0$  es despreciable cuando  $t_0 = 0$  entonces, podremos escribir  $D^2 = kt$  o bien  $D = \sqrt{kt}$

De la última igualdad, vemos que el diámetro es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo, esto es, que la velocidad del crecimiento de grano disminuí a medida que pase el tiempo. En fórmulas:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{\sqrt{k}}{2\sqrt{t}}$$

Consideremos ahora, el caso del crecimiento de grano en policristales. En éstos como en la espuma de jabón, la fuerza que impulsa la reacción proviene de la reducción de la energía superficial de los granos.

En ambos casos, la rapidez de crecimiento de grano, depende de la curvatura, y de las fronteras que se mueven hacia el centro de curvatura. En el caso del policristal, la fuerza por unidad de

área con que se mueve el grano, es proporcional a  $\sigma(R_1, R_2)^5$  donde la tensión es  $\sigma$  y es la tensión superficial de la frontera y  $R_1$  y  $R_2$  son los radios de curvatura principales. Sin embargo, mientras que en la espuma de jabón el crecimiento de las celdas puede explicarse mediante la difusión de gas a través de las paredes, en los policristales los granos crecen cuando los átomos de un lado cruzan la frontera y se incorporan al grano en crecimiento.

Suponiendo como se hizo para la espuma de jabón que el diámetro está relacionado con el radio de curvatura medio y que la dificultad de avance de las fronteras es proporcional, Burke dedujo en forma análoga a como se hizo en el párrafo anterior, la expresión siguiente:  $D^2 - D_0^2 = \frac{k_0 \sigma}{2} t e^{-\frac{Q}{RT}}$  donde  $D_0$  = tamaño de grano inicial  $k_0$  = constante y  $Q$  = energía de activación necesaria para el proceso.

Crecimiento de grano para  $UO_2$ .-- Desafortunadamente, el crecimiento de grano en el  $UO_2$  no se ajusta exactamente a la ecuación anterior.

En un artículo publicado por Lyon, se hace un estudio de los datos presentados por McEwan, Padden, Stehle, Hausner y Runfor. Este estudio tuvo por ob-

jeto deducir una ecuación de crecimiento de grano a partir de los datos experimentales. Los datos experimentales en este reporte son: T=temperatura, t=tiempo,  $D_0$ =tamaño de grano inicial, D=tamaño de grano final, n=constante y k=constante.

Se supuso arbitrariamente que  $\frac{dD}{dt} = \frac{k}{D^n} \rightarrow D^3 - D_0^3 = kt^n$

Para conocer el valor de la n, se procedió de la siguiente manera: de la última ecuación se graficó  $\ln(D^3 - D_0^3)$  v.s.  $\ln k + n \ln t$ ; de la gráfica de  $\ln(D^3 - D_0^3)$  contra  $\ln t$ , se tomó la pendiente y se le asignó la letra n, ésta a su vez se graficó contra la temperatura T para explicitar la dependencia. En dicha gráfica, 16 de los 25 valores se localizaron entre .8 y 1.2, así que  $n=1$  es razonable.

Después, para calcular el valor de k, se tomaron los datos para los cuales las t eran constantes, la gráfica se hizo a partir de la relación  $\frac{D^3 - D_0^3}{t} = k$  y se calculó k para cada punto experimental.

Posteriormente se graficó  $\ln k$  contra  $\frac{1}{T}$  y se halló que  $k = k_0 e^{-\frac{Q}{RT}}$  y en la intersección con el eje vertical se obtuvo que  $k_0 = 5.096 + 2.48 \times 10^{-4} Q$  donde Q se halló de la pendiente de la gráfica de  $3 \ln D$  contra  $\frac{1}{T}$ . Por lo tanto, concluimos que la ecua-

ción completa que mejor se ajusta al crecimiento de grano en  $UO_2$  es:

$$D^3 - D_0^3 = k_0 t e^{-\frac{Q}{RT}}$$

En donde hay discrepancias, se explicará satisfactoriamente en base a los factores que es sabido que afectan el crecimiento de grano. Entre ellos se encuentran:

- a) Inhibición de migración de fronteras por poros e inclusiones.
- b) Efectos de la estequiometría.
- c) Efecto de compresión.
- d) Efecto de la irradiación.
- e) Crecimiento de grano equiaxial usado como medidor de temperaturas.

**a) INHIBICION DE MIGRACION DE FRONTERAS POR POROS E INCLUSIONES.**

Un análisis atribuido a Zener, indica que el crecimiento llegará a un máximo en función de los poros e inclusiones de acuerdo con la siguiente expresión:

$$D_m = \frac{8}{3 \sum \frac{f_i}{r_i}}$$

donde  $f_i$  es la fracción volumétrica de poros de radio  $r_i$ .

Los poros e inclusiones, introducen una fuerza re-

tardadora que podemos llamar C, así que la ecuación

$$\frac{dD}{dt} = \frac{k}{D^2} - C, \text{ la } D \text{ será máxima cuando } C = \frac{k\sigma}{D_m}$$

así que la ecuación quedará 
$$\frac{dD}{dt} = k\sigma \left( \frac{1}{D} - \frac{1}{D_m} \right)$$

Aunque la energía de activación entre fronteras y poros o inclusiones son similares, el resultado puede ser diferente al de la ecuación anterior pues los poros vacíos y los que contienen gases solubles pueden ser reducidos de tamaño o desaparecer en una frontera debido a la posibilidad de difusión en ésta. Siendo así las cosas, la inhibición esperada puede ser menor, dependiendo de la distribución de poros. Además, los poros pueden emigrar a través del cristal por difusión de los átomos de la matriz alrededor de los poros de la superficie en tanto que inclusiones de similar tamaño son menos móviles.

#### b) EFECTOS DE LA ESTEQUEOMETRIA.<sup>5</sup>

Se han hecho experimentos haciendo variar la proporción  $U_0$  para estudiar como afecta esta variación al crecimiento de grano. Estos experimentos mostraron que el proceso sigue una ecuación de crecimiento con  $m=2.5$

cuando el dióxido de uranio está en la proporción  $UO_{2+x}$  donde  $.016 < x < .13$ . La variación de la  $k$  con el aumento en la cantidad de oxígeno viene dado en la figura 5

Esto quiere decir que incrementando la cantidad de oxígeno desde dióxido de uranio estequiométrico hasta  $UO_{2.23}$  se incrementa la constante de crecimiento hasta cuatro órdenes de magnitud a  $1325^{\circ}C$ . La energía de activación fue determinada a una composición de  $UO_{2.02}$  y se halló que era de  $66 \pm 10$  kcal/mol. Esto es, el 60% de la energía de activación en el  $UO_2$  estequiométrico y está de acuerdo con los estados experimentales. La producción de  $UO_2$  tiene una variación comprendida entre  $2.005 \pm .003$ ; esta variación es equivalente a un cambio de ocho veces la constante de crecimiento a  $1325^{\circ}C$ .

#### c) EFECTO DE COMPRESION.

Hasta la fecha existen experimentos que hayan estudiado el efecto de compresión en el crecimiento de grano. Sin embargo, este fenómeno es de interés, pues para que haya buena conductividad entre el combustible y la vaina, se selecciona ésta última de modo que cuando el combustible se expande la presione.

Experimentos llevados a cabo por MC Ewany Hayashi

mostraron que a  $2000^{\circ}\text{C}$  y con compresiones de 0,40, 80 y  $120\text{ kg/cm}^2$  durante 140 min. y luego a  $2200^{\circ}\text{C}$  y  $1650^{\circ}\text{C}$  con compresiones de 40, 125 y  $38\text{ kg/cm}^2$  no causaron modificación apreciable en el crecimiento de grano. Sin embargo, un gradiente de compresión causado por una superficie delgada presionando a otra superficie amplia en relación a la primera, produjo un aumento observable en el crecimiento de grano a una compresión de sólo  $180\text{ kg/cm}^2$  y a una temperatura de  $1650^{\circ}$ . Mayores compresiones o mayores tiempos de recocido, aumentaron aún más el tamaño del grano.

En un reactor típico, una compresión de  $200\text{ kg/cm}^2$  es ejercida en las partes externas del combustible, es esta presión rompe el  $\text{UO}_2$ . Los pedazos actúan en la misma forma que observamos en los experimentos de laboratorio. Tanto en el reactor como en el laboratorio, se calcula que el efecto de las compresiones sobre el crecimiento de grano, es equivalente a un aumento de  $100^{\circ}\text{C}$  en la temperatura.

#### d) EFECTO DE LA IRRADIACION.

Cuando sometemos una muestra de  $\text{UO}_2$  a irradiación, pueden ocurrir dos fenómenos de efectos opuestos sobre

el crecimiento de grano:

a) La gran concentración de defectos puntuales, puede facilitar la transferencia de átomos a través de la frontera aumentando así la rapidez de crecimiento de grano.

b) Las impurezas debidas a los residuos de la fisión, pueden inhibir este crecimiento.

En un experimento, se sometió al  $\text{UO}_2$  a una temperatura por debajo de  $400^\circ\text{C}$  y al estudiar posteriormente como crecía el grano a  $1800^\circ\text{C}$ , se observó una marcada disminución de la constante de crecimiento de grano. Esta inhibición es proporcional a la irradiación recibida en la forma que muestra la figura 6

También se observó que la porosidad en las fronteras de grano aumenta cuando la irradiación es alta.

En otro experimento se procuró tener la temperatura constante (aumentó de  $1200$  a  $1730^\circ\text{C}$  en 27 días) y se notó que en el  $\text{UO}_2$  irradiado, el grano creció de  $4.9$  a  $6\mu\text{m}$  en tanto que otra muestra de  $\text{UO}_2$  no irradiada creció bajo las mismas condiciones de  $7.4$  a  $3.7\mu\text{m}$  de modo que la constante de crecimiento de grano, se redujo en un factor de 200 veces.

Si se quisiera atribuir esta reducción a las impurezas, entonces habría que aceptar que los residuos de la fisión eran particularmente efectivos para reducir la constante del crecimiento de grano. Ellos estudió el crecimiento de grano en Al con He como impureza y concluyó que esto es más efectivo inhibiendo el crecimiento de grano en Al que cualquier otro soluto. Por analogía esperaríamos que el Ad y el Kr fueran inhibidores muy efectivos.

Puesto que el Xe y el Kr se precipitan como burbujas o nubes, se usó la relación de Zener y la ecuación para crecimiento de grano bajo la influencia de porosidad e impurezas. Además, como el  $UO_2$  irradiado tiene porosidad y ésta puede inhibir levemente el crecimiento de grano, hubo que elegir un tamaño de grano límite para poder calcular la constante de crecimiento. Se eligió el valor de  $50 \mu m$ . De cualquier forma, la elección no es crítica puesto que el valor se eligió mayor de  $40 \mu m$ . Los tamaños de grano obtenidos después de cada irradiación, se usaron para calcular los tamaños de grano límites y estos valores se usaron para calcular la sección recta de área  $\sum n_i r_i^2$ . Después se supuso que la presión de las burbujas, estaba en equilibrio con la ten-

sión superficial del  $\text{UO}_2$ , se supuso también que esta tensión valía  $1000 \text{ dinas/cm}^2$  y se usó un diámetro de  $25 \text{ \AA}$ . La cantidad de gas en las burbujas, se calculó corrigiendo de acuerdo a las ecuaciones de Van der Waals.

Cuando se compararon la teoría con el experimento, se encontró que la cantidad de burbujas de gas producido por la fisión era muy pequeña como para explicar la inhibición del crecimiento de grano. Esta concentración fue 30 veces más pequeña a una irradiación de  $2.8 \times 10^{17}$  fisiones/ $\text{cm}^3$ .

Siendo así las cosas, la inhibición tuvo que ser atribuida a otros factores. Estos pueden ser: los átomos de gas introducidos en la estructura, segregación de las burbujas de gas en las fronteras de grano u otros daños producidos por la irradiación.

La segregación de las burbujas de gas, puede tener lugar en varias formas. Pueden haberse precipitado en las fronteras de grano porque la nucleación fuera fácil ahí o se pueden haber nucleado en el interior del grano y al difundirse quedar atrapados en la frontera. Posteriormente, el movimiento de las fronteras pudo haberlas recolectado durante el crecimiento de grano.

Golyanov y Pravdyuk reportaron que sin importar el mecanismo, el  $\text{UO}_2$  expuesto a irradiaciones en el rango de  $10^{16}$  a  $10^{19}$  fisiones/cm<sup>2</sup> incrementa la temperatura necesaria para inducir el crecimiento de grano en 200°C.

e) CRECIMIENTO DE GRANO EQUIAXIAL USADO COMO MEDIDOR DE TEMPERATURAS.

Hay varias formas de usar el crecimiento de grano equiaxial como medidor de temperaturas, una de ellas es la usada en el laboratorio de Chalk River y es así: se especifica el límite de grano equiaxial como el diámetro de grano que pueda discernirse en una fotografía del combustible a 4 aumentos. Experimentalmente, se halló en este laboratorio que este diámetro es de 25  $\mu\text{m}$ . Así el problema de usar el grano equiaxial como un medidor de temperaturas, se redujo a la predicción de la temperatura requerida para producir granos de 25  $\mu\text{m}$  en un período equivalente a la duración de la irradiación.

### CAPITULO III

#### "CRECIMIENTO DE GRANO" COLUMNAR.

Este fenómeno difiere del crecimiento de grano tradicional en cuanto a que la formación del cristal, éstos, el alargamiento del grano, no se produce siempre a través de las fronteras sino por la migración de poros.

El presente tratamiento, se hará en base a un examen de poros sujetos a un gradiente térmico que migran bajo mecanismo de evaporación-condensación.

Consideremos un poro esférico inicialmente al vacío y que los átomos en su superficie están sujetos a una fuerza inicial arbitraria; entonces, el flujo de moléculas de  $\text{UO}_2$  que dejan la superficie a un ángulo es.

$$J_v = \left\{ \frac{D_v}{\Omega_v k T} \right\} f_n = \frac{D_v}{\Omega_v k T} f \cos \theta \quad \text{donde}^B (1)$$

$D_v$  = coeficiente de difusión de las moléculas del combustible a través del vapor del poro.

$\Omega_v$  = volumen por molécula de combustible en el vapor.

$k$  = constante de Boltzmann.

$T$  = temperatura absoluta.

$f_n$  = componente normal de una fuerza impulsora por molécula de combustible.

Puesto que  $J_v$  es perpendicular a la superficie del

poro en cada punto, la rapidez del movimiento de la superficie es simplemente el negativo del producto de  $\lambda_v$  y el volumen por molécula de combustible en el sólido, llamémosle  $\Omega_s$ . Así, tendremos

$$\frac{d\ell}{dt} = \left\{ - \frac{Dv}{kT} \right\} \frac{\Omega_s}{\Omega_v} f \cos \theta \quad (2) \quad \text{donde } \frac{d\ell}{dt} = \text{rapidez de cambio}$$

de la longitud del vector al origen a la superficie del poro. Se puede expresar  $\frac{\Omega_s}{\Omega_v}$  como  $\frac{C_v}{C_s}$  que es la razón del número de moléculas por unidad de volumen en el vapor, entre el número de moléculas por unidad de volumen en el sólido. Así y suponiendo que los cambios en la presión del vapor debidos a la capilaridad son pequeños, esto es, suponiendo que  $r$  es grande, tenemos:

$$\frac{C_v}{C_s} = \left\{ \frac{P_0 \Omega}{kT} \right\} \exp \left\{ - \frac{\Delta H_v}{RT} \right\} \quad (3) \quad \text{donde}$$

$P_0 = \text{cte}$   $\Omega = \text{volumen molecular del combustible.}$

$R = \text{constante de los gases. } \Delta H_v = \text{calor molar de vaporización.}$

$P_0 = \exp \left\{ - \frac{\Delta H_v}{RT} \right\} = \text{presión del vapor de combustible.}$

Sustituyendo (3) en (2), tenemos:

$$\frac{d\ell}{dt} = \left\{ - \frac{Dv \Omega}{(kT)^2} \right\} \exp \left\{ - \frac{\Delta H_v}{RT} \right\} f \cos \theta \quad (4)$$

Si suponemos que  $f$  se debe al gradiente térmico, entonces:

$$f = \left( -\frac{\Delta H_v}{T} \right) \left( \frac{dT}{dx} \right)_{\text{poro}}^{10} \quad (5) \quad \text{donde } \frac{dT}{dx} \text{ es el gradiente térmico dentro del poro.}$$

De la teoría Cinética se sabe:

$$D_v = \left( \frac{1}{2} \pi \right)^{1/2} \left( \frac{RT^3}{8n\pi\sigma^2} \right) \left\{ \frac{M_1 + M_2}{M_1 M_2} R \right\}^{1/2} \quad (6) \quad \text{donde } M_1, M_2 = \text{peso molecular}$$

del combustible y del vapor primario respectivamente.

$\pi\sigma^2$  = sección recta para la colisión de los dos vapores.

$N$  = número de moléculas de vapor por unidad de volu-

$$\text{men} = \frac{P}{kT}$$

$P$  = presión total en el poro.

Además el gradiente térmico en el poro es diferente del gradiente térmico macroscópico y para el caso de una es-  
pera con conductividad mucho menor que la de la matriz,  
tendremos:

$$\left( \frac{dT}{dx} \right)_{\text{poro}} = \frac{3}{2} \frac{dT}{dx} \quad (7)$$

Sustituyendo (5), (6) y (7) en (4), tenemos

$$\frac{dP}{dt} = \frac{9P_0 \Delta H_v [N(M_1 + M_2)]^{1/2} \exp\left(-\frac{\Delta H_v}{RT}\right)}{16P_0^2 T^{3/2} (2\pi k M_1 M_2)^{1/2}} \frac{dt}{dx} \cos \theta \quad (8)$$

donde

donde  $N = R/k =$  número de Avogadro.

La ecuación (8) describe la translación de la esfera sin distorsión, solo si el coeficiente de  $\cos \theta$  no varía con la superficie del poro. Esto es aproximadamente válido para poros pequeños y los efectos de capilaridad son suficientemente fuertes como para conservar la forma esférica.

Para poros mayores, la variación del coeficiente comienza a ser apreciable y las fuerzas de capilaridad son más pequeñas de modo que el poro ya no es estable en un gradiente térmico. Desde luego, la fuente de mayor variación en la superficie del poro viene del término exponencial que es claramente mayor en el lado de mayor temperatura. Así el movimiento del "lado caliente" es mayor que la del "lado frío" y el poro se transformará de forma esférica a forma acircular con el eje orientado en la dirección del gradiente. La ecuación (8) nos predice un alargamiento ilimitado, sin embargo, cuando el poro se extiende, la curvatura en los extremos aumenta y eventualmente las fuerzas de tensión superficial serán suficientemente grandes como para detener el proceso. Este poro alargado es a su vez inestable y se rompe en un grupo de esferitas alineadas a lo largo del gradiente.

Los poros también pueden alargarse durante el enfriamiento del combustible que estaba fundido durante el funcionamiento del reactor. La ruptura en esferitas sería un fenómeno análogo al caso anterior.

Una estimación del orden de magnitud por encima del cual el poro comienza a ser inestable puede obtenerse como sigue:

Supóngase que la forma en el límite de inestabilidad es aproximadamente un cilindro de radio  $r$  de longitud no mucho mayor que  $2r$  y con terminales semi esféricas de radio  $r$ . La inestabilidad surge cuando la fuerza distorsionadora es igual a la fuerza restauradora debida a la capilaridad, dada por la relación.

Gibbs - Thomson que es  $f = \gamma \frac{\partial k}{\partial s}$  donde  $\gamma$  es la tensión superficial,  $k$  es la curvatura total y  $s$  es la distancia en la que la curvatura varía. Con estas aproximaciones,

$\frac{\partial k}{\partial s} \sim \left( \frac{2}{r} - \frac{1}{r} \right) / r \sim \frac{1}{r^2}$ . La diferencia en los valores de la ecuación (5) evaluada en los extremos del poro, exhibe una fuerza de distorsión  $3\Delta H_v \left( \frac{4}{3} \right) r^2 / r^2$ .

Ahora, igualando las dos fuerzas opuestas, tendremos el radio crítico del poro.

$$r^* \sim \left[ \frac{\gamma \Delta T^2}{3\Delta H_v \left( \frac{4}{3} \right)} \right]^{1/2} \quad \text{Con } \gamma = 10^3 \text{ erg/cm}^2,$$

$\Omega \sim 4 \times 10^{23} \text{ cm}^3$ ,  $T \sim 2000^\circ \text{K}$   $\Delta H_v \sim 10^{11} \text{ erg/átomo}$  y

$\frac{dT}{dx} \sim 10^3 \text{ }^\circ \text{C/cm}$ , tenemos que  $r^* \sim 20 \mu\text{m}$ . Ahora, si

$\frac{dT}{dx} \sim 10^4 \text{ }^\circ \text{C/cm}$ , tenemos que  $r^* \sim 20 \mu\text{m}$ .

Aunque estos cálculos son bastante aproximados se espéra que los resultados estén correctos dentro de un orden de magnitud. Así, los poros mucho mayores de  $10 \mu\text{m}$  no sobrevivirán si están a una temperatura tal que haya movilidad atómica apreciable y si además hay gradientes térmicos grandes ( $> 10^3 \text{ }^\circ \text{C/cm}$ ).

Para el caso del  $\text{UO}_2$ , es un tanto incierto aplicar la ecuación (8) pues no se sabe realmente el origen de los poros. Además, hay otra fuente de incertidumbre en la elección del vapor y presión de vapor en los poros. Aquí supondremos  $P$  como una constante independiente del radio de los poros.

Si ahora suponemos que existen poros que se presen a la formación del grano columnar en todas las posiciones radiales, podremos calcular la temperatura central requerida para que haya movimiento "significativo" de poros (pe  $1/3$  del radio de la pastilla) en un tiempo dado empleando la ecuación (8). Los resultados no son muy sensibles a la elección de la temperatura de la superficie, aquí la consideramos como  $800^\circ \text{K}$ .

Los resultados de este análisis los presentamos en la figura (7). En caso de un experimento en que tengamos los parámetros experimentales podremos usarlos para aplicar la ecuación (8) y obtener nuestros resultados.

Desde luego, este análisis fija las condiciones mínimas para la extensión del grano columnar. Si los huecos necesitan ser nucleados y si la nucleación es lenta, el crecimiento esperado puede requerir mayores temperaturas y/o mayor tiempo.

Se espera que a baja densidad del combustible, la nucleación no sea muy difícil.

No es posible hacer una prueba a la presente teoría pues no hay datos experimentales que relacionen este "crecimiento de grano" con la temperatura y el tiempo.

Las temperaturas "límites" para crecimiento de grano columnar han sido estimadas a partir de esta teoría y se presentan en la figura (8).

El acuerdo entre la teoría y el experimento, es excelente. Se recomienda experimentos usando combustible a la misma temperatura máxima y empleando intervalos de variación amplios en el tiempo.

Existen otros tratamientos para explicar el crecimiento del grano columnar, una de ellas es el de Mc Ewan y Lawson. Ahí se calcula primero la migración de los poros basándose en la diferencia de velocidad de evaporación en las caras del poro y luego calculando la rapidez de migración del poro igualando la rapidez  $\frac{dL}{dt} \frac{cm}{seg}$  a la diferencia de evaporación en las caras de un poro entre la densidad es,  $G = 5.833 \times 10^{-1} P \sqrt{T}$  donde  $P(mmHg)$

es la presión del vapor del sólido a temperatura  $T (^{\circ}K)$  y  $M$  es el peso molecular.

$$\frac{dL}{dt} = \frac{G_1 - G_2}{\rho} \quad \text{donde } \rho = \text{densidad.}$$

Desafortunadamente, este tratamiento emplea la razón de evaporación en vacío y éste no es el caso para el  $UO_2$  en el reactor.

Existe otro tratamiento que supone que los poros permanecen circulares y esta suposición no es válida pues bien pueden distorsionarse como supone y trata Nichols.

Existen por último, pruebas de que el grano columnar puede crecer aún en ausencia de huecos. Esto se de-

mostró en la forma siguiente:<sup>43</sup>

Se prepararon pastillas de 80 % en peso de zirconio estabilizado y pastillas de 50 % dióxido de uranio y 50 % de alúmina. No son miscibles y tienen un punto eutéctico conteniendo 74 % mol  $\text{Al}_2\text{O}_3$  que se funde a  $1900 \pm 10^\circ\text{C}$ , el crecimiento de grano columnar por el mecanismo de evaporación condensación no se espera en el segundo caso puesto que no son miscibles y sus puntos de fusión son muy distintos.

O sea, la alúmina puede fundirse y reunir condiciones para su evaporación en un poro, pero al llegar a la frontera con el  $\text{UO}_2$  éste está aún "frío" i.e. no reúne condiciones para evaporarse.

Sin embargo, en un examen de las pastillas de uranio, alúmina, se observaron granos columnares.

En las zonas en donde la temperatura es conveniente, el punto eutéctico tiende a descomponerse y la alúmina es empujada, probablemente en estado viscoso hacia la parte más fría de la pastilla a través de canales establecidos en los intersticios entre los granos del uranio.

Cuando una región es limpiada de alúmina, quedan granos columnares de  $\text{UO}_2$  puro. Este mecanismo no impli-

ca evaporación condensación y en efecto, no se observan huecos ni poros.

Flipot y Collignon<sup>12</sup> han desarrollado una técnica que permite identificar una isoterma a partir del radio de crecimiento de grano columnar inducido por una fase dispersa en el  $\text{UO}_2$ . Este método es bastante confiable y consiste en esparcir polvo de algún material en  $\text{UO}_2$  antes del sinterizado. La selección del polvo, se hace en base a las siguientes consideraciones:

- a) que el material utilizado no reaccione por debajo de de una temperatura bien definida.
- b) que el monitor no sea soluble en el material de base para no modificar su conductividad térmica.
- c) Como la temperatura de recocido del  $\text{UO}_2$  es del orden del  $1600^\circ\text{C}$  y los experimentos de irradiación se orientan a la obtención de temperaturas centrales elevadas, es conveniente elegir un monitor de temperaturas capaz de revelar una isoterma superior a  $1700^\circ\text{C}$ .

Los monitores de interés serán por lo tanto, los metales o los cerámicos estables en presencia de  $\text{UO}_2$  y que formen una eutéctica a altas temperaturas.

Los metales son descartados pues reaccionan gradualmente con el  $\text{UO}_2$  y no dan por lo tanto una isoterma bien

definida.

El examen de diagramas de fase, permite seleccionar varios materiales cerámicos susceptibles de ser utilizados como monitores dispersos. Entre ellos tenemos a la alúmina, la glucina y la magnesia. Dado que el óxido de birilio es tóxico y que no sabemos la temperatura eutéctica del  $\text{UO}_2\text{-MgO}$  nos queda sólo la alúmina. La alúmina presenta además, la ventaja de que es fácil adquirir en forma de polvo de distinta fineza.

La figura (9) muestra el diagrama de fase entre el  $\text{UO}_2$  y el  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y vemos que estos dos materiales forman una eutéctica a  $1915 \pm 15^\circ\text{C}$  conteniendo el 76 % por mol de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Además debajo de esta temperatura, no se forma ninguna solución sólida.

Cuando se estudia el efecto del polvo, resaltan dos hechos:

- 1) hace crecer el tamaño del grano equiaxial de modo que cuando la concentración de la alúmina aumenta, aumenta el tamaño de grano. Este hecho se ilustra en la figura (10).
- 2) Al aumentar el % de alúmina, disminuye el radio eutéctico en la forma que ilustra la figura (11).

Formación del hueco central. La migración de los poros hacia el centro de la barra produce un hueco cen-

tral. A este fenómeno se ha llamado "coring" la teoría presentada al principio del capítulo, puede ser aplicada a la formación del hueco central si suponemos que la ecuación (8) da correctamente la migración del poro y usando la figura (12A).

Para obtener el radio del hueco central, multiplicamos el radio del grano columnar crecido por la fracción  $\left(\frac{\text{Porosidad}}{\text{volumen}}\right)^{1/2}$ .

## CAPITULO IV

Conductividad térmica y distribución de temperaturas en  $\text{UO}_2$ .

Se han reportado muchas determinaciones de la conductividad térmica del  $\text{UO}_2$  en ausencia de irradiación pero pocas determinaciones se han hecho durante la irradiación. Como ninguna pastilla se ha examinado durante la irradiación, el efecto de ésta en la conductividad sólo puede apreciarse después de haber considerado la aproximación de cada método empleado y otros factores que afectan la conductividad. Comparando la conductividad de la misma pastilla antes y después de la irradiación, se ha establecido cómo puede ocurrir las variaciones en la conductividad. Sin embargo, todas las muestras han sido irradiadas a bajas temperaturas ( $< 500^\circ\text{C}$ ) y para este caso, la modificación de la conductividad es pequeña.

Conductividad del  $\text{UO}_2$  no irradiado<sup>44</sup>. Han sido publicadas seis investigaciones de la conductividad térmica del  $\text{UO}_2$  (fig.12). Sólo dos de éstas han mostrado consistencia, midiendo en dos pastillas iguales y obteniendo resultados prácticamente iguales. Dos de los resultados

extremos, fueron obtenidos de materiales de muy baja densidad (73 y 75 % de la densidad teórica) y consecuentemente, incorporan correcciones grandes por el efecto de porosidad. Confirmación de los resultados altos, se obtuvieron para muestra bajas temperaturas y alta densidad (92 a 96 % de la teórica). Del conocimiento del proceso de fabricación empleado creemos que las muestras estudiadas por Kingery contenía poros casi isométricos en tanto que las de Hedge y Fieldhouse tenían poros de tamaño irregular. Las muestras de Reuswig también eran de baja densidad pero como el método no está completamente descrito, no se pueden juzgar sus resultados. La investigación de Lucks y Deem ha mostrado una reducción aparente en la conductividad cuando las fisuras se desarrollan. La conductividad de una muestra que tenía estas fisuras, apareció en la curva 3 de la figura (13). Las fisuras se alargaron y ampliaron después de la primera serie de experimentos y posteriormente, una segunda serie de experimentos, reportó una disminución del 12 %.

Así, debido a fisuras y porosidad, los bajos valores obtenidos, probablemente representan subestimaciones de la conductividad térmica real.

Lucks y Deem demostraron la consistencia de su mé-

todo para tres muestras (la curva 1 figura 13). La variación en la conductividad térmica asociada al cambio en el proceso de fabricación puede ser debido a variaciones en la distribución de la porosidad.

También pueden intervenir los niveles de impurezas debidas a la adición de lubricantes.

De las consideraciones anteriores, nos inclinamos a creer que la conductividad térmica real, se encuentra en el rango definido por los resultados de Luck y Deem.

Conductividad térmica del  $UO_2$  bajo irradiación.-

Aunque a la fecha ha habido algunos grupos que han reportado resultados de la conductividad térmica, del  $UO_2$  bajo irradiación, aquí daremos únicamente los resultados de las experiencias del grupo de Chalk River por ser aparentemente los más adecuados.

El método consiste graficar la conductividad integrada en función de la temperatura, después se deriva la curva resultante con respecto a la temperatura, obteniéndose así la conductividad térmica. Fig.15. A esta gráfica, podemos ajustarle una función del tipo

$$K = \frac{K_2}{T} + K_1 T^3 \quad 15)$$

Con la temperatura de la superficie, la potencia generada por unidad de volumen y la conductividad tér-

mica, podemos dar el perfil de temperaturas de la pastilla del  $\text{UO}_2$ .

Procederemos a dar una descripción de los pasos a seguir teórica y experimentalmente.

La conductividad térmica  $K$  del  $\text{UO}_2$  bajo irradiación, no puede ser medida experimentalmente por dificultades tecnológicas. Sin embargo, a una temperatura está definida así:  $\dot{W} = -K \frac{dT}{dx}$  donde  $\dot{W}$  = flujo de calor a través de un área unitaria cuya normal se encuentra en la dirección  $x$  perpendicular a la superficie de la pastilla.

Para un combustible cilíndrico con una depresión apreciable del flujo de neutrones<sup>10</sup> a través de su sección transversal en la dirección radial, se cumple que:

$$\int_{T_s}^{T_o} k d\theta = \frac{1}{4\pi} qF \quad \text{donde } T_s, T_o \text{ son las temperaturas}$$

de la superficie del combustible y del eje central respectivamente  $q$  = potencia generada por la longitud unitaria axial del combustible y  $F$  es un término de corrección debida a la forma no uniforme con que se deposita el calor en la pastilla.

Experimentalmente, el miembro derecho de la ecuación puede determinarse por el método de análisis de por ciento de fisiones u otros métodos.

Para combustibles hechos del mismo material, y con la misma temperatura de superficie, la conductividad integrada (miembro izquierdo de la ecuación) da un valor aproximado para la temperatura central sin requerir ninguna medida o conocimiento de la conductividad verdadera.

En la gráfica de la figura 14 están todos los resultados experimentales del grupo de Chalk River de modo que solamente haremos algunos comentarios a las medidas individuales.

a) En las pastillas III y IV, la temperatura central fue medida con un termopar y la temperatura de la superficie fue estimada de la temperatura del refrigerante. La potencia generada fue calculada de la diferencia final del por ciento de átomos fisionados.

b) Cuando se usaron termopares de tungsteno/rodio el mismo tipo de experimentos se extendió a temperaturas elevadas, usando agua a presión como refrigerante.

La potencia generada, se calculó por medio de "loop coloumetry" y además fue checada por análisis del por ciento de átomos fisionados. Los termopares, eventualmente reaccionaron con el  $\text{UO}_2$  calentado, pero los resultados de la fig. 14 fueron obtenidos antes de que hubie-

ra muestras de falla en los termopares.

c) Las medidas marcadas "crecimiento de grano" fueron deducidas de estudios del mismo que hemos visto en un capítulo anterior. La temperatura de la superficie, fue estimada de la temperatura del refrigerante y la generación de potencia, fue calculada como calorimetría del refrigerante.

d) La marca señalada como punto de fusión o simplemente fusión fue obtenida de acuerdo a las discusiones presentadas en el capítulo correspondiente al crecimiento de grano columnar.

Con los datos así obtenidos, se puede trazar una curva consistente con estos resultados. Es conveniente señalar que un cambio del 10 % en cualquier dirección, haría que la curva se saliera de los resultados experimentales.

Puesta y aceptada así la curva, se deriva con respecto a la temperatura y tenemos así una gráfica de la conductividad térmica contra la temperatura. Esta gráfica se ilustra en la figura 15.

Para poder hacer comparaciones entre diversas medidas de la conductividad térmica, es necesario conocer los factores que se ha visto la afectan. Cuatro de

tales factores discutiremos en los siguientes párrafos.

**POROSIDAD.** Este es un factor en el que hay poco acuerdo. Un análisis teórico de Loeb ha demostrado que para temperaturas en donde la transferencia de calor a través de los poros es insignificante, la conductividad medida  $K_m$  está relacionada con la conductividad de un material completamente denso.

El modelo analizado, consistía de poros de la misma forma. Frand y Kingery confirmaron estos resultados experimentalmente para otras muestras.

En contraste, el único resultado experimental reportado para el  $UO_2$  sinterizado, da la relación:  $K_m = (1-2P)Kt$ . La diferencia fue atribuida a la forma irregular de los poros dado que las temperaturas eran tales que la transferencia de calor por radiación era despreciable y que para una porosidad dada, los poros esféricos ofrecen la menor resistencia al flujo de calor.

**Exceso de oxígeno.**— La opinión de los investigadores en cuanto a la presencia de un exceso de oxígeno en  $UO_2$  es que baja la conductividad térmica. La figura 16 muestra resultados obtenidos para  $UO_2$  no irradiado.

Como base para la comparación, la curva del  $UO_2$

se trazó con los datos de Lucks y Dean. Puesto que todos los experimentos comparan el valor del  $UO_{2+x}$  al del  $UO_{2+0}$ . Los resultados están en relación a éste último.

Para el caso del  $UO_{2+x}$  hay menos experimentos y puesto que éstos muestran los resultados en términos de la conductividad integrada, los resultados los damos en términos de esta función (fig. 17). De la figura, podemos observar que al aumentar la cantidad de oxígeno, va bajando la conductividad integrada a una temperatura dada.

Impurezas y aditivos.- Se espera que cualquier impureza o aditivo, rompa la periodicidad de la red del  $UO_2$  reduciendo su conductividad térmica. Se han ensayado varios elementos y en ninguno de los casos se han producido reducciones en la conductividad térmica que sobrepase al 10 % por .1 mole de aditivo.

Por otra parte, se ha intentado poner como impureza una segunda fase de conductividad térmica más alta y se halla que el efecto sólo es importante si esta fase es continua y está orientada en la dirección del flujo de calor.

Uno de los experimentos que han alcanzado mayor é-

xito se llevó a efecto en Battelle y se obtuvo una fase con sólo el 20 % de molibdeno. En los experimentos de laboratorio, se vio que la conductividad era cinco veces mayor que la del  $\text{UO}_2$  puro, a temperaturas arriba de  $900^\circ\text{C}$ . Sin embargo, durante la irradiación, los fragmentos de la fisión empujan la molibdeno y por esto es probable que la conductividad no sea tan alta como pudiera esperarse. Además, este material no es económico para reactores que trabajan con  $\text{UO}_2$  natural, pero pueden ser ventajosas para reactores que trabajan con  $\text{UO}_2$  enriquecido.

También se ha intentado incrementar la conductividad con óxido tri o penta valentes. Sin embargo, bajo irradiación no ha habido éxito a la fecha.

Quemado (No. de fisiones/ $\text{cm}^3$ ). En el rango de mayor interés tecnológico (sobre  $400^\circ\text{C}$  y un quemado menor de 40,000 Mwd/TonnU. Nota  $-40,000 \text{ Mwd/TonnU} = 10^{21}$  fisiones/ $\text{cm}^3$ ) la conductividad térmica del  $\text{UO}_2$  cambia muy poco durante irradiación.

Es interesante notar que para combustible típicos, el equilibrio térmico se alcanza entre 1 y 3 minutos.

Se han hecho experimentos irradiando muestras en un tiempo de 30 a 40 minutos para  $T_g$  constante.

También se hicieron experimentos para pastillas

irradiadas dos semanas (300 MwD/TonneU) con los resultados arriba citados.

Una vez determinada la conductividad térmica, el problema se traslada a la determinación del perfil de temperatura. Para resolverlo, procederemos de la siguiente forma:

Supondremos primero que el flujo se hace a través de una pared plana con fuentes de calor en cada punto y luego lo adaptamos al caso del cilindro que es el que nos interesa. Dado que el calor se genera en cada punto del combustible y dado además como señalamos que el equilibrio térmico se establece en pocos minutos, esto es que el flujo se vuelve estacionario, podemos expresar una ecuación de conservación de energía así:<sup>18</sup>

$$\begin{array}{ccc} \text{Calor conducido a través} & & \text{Calor generado por} \\ \text{de la cara izquierda du-} & + & \text{las fuentes duran-} \\ \text{rante un tiempo} & & \text{te el tiempo} \end{array} =$$

Calor conducido a través de la cara derecha durante un tiempo  $\Delta\theta$

o expresado matemáticamente

$$-KA \left. \frac{dT}{dx} \right|_{\text{en } x} \Delta\theta + \dot{q}(\lambda \Delta x) \Delta\theta = -KA \left. \frac{dT}{dx} \right|_{\text{en } x + \Delta x} \Delta\theta$$

donde  $K$  = conductividad térmica.

$A$  = área perpendicular al flujo de calor.

$dt/dx$  = gradiente de temperaturas con respecto a la posición.

$\dot{q} (A \Delta x)$  = calor generado en la unidad de volumen.

$x$  = parte izquierda en el elemento de la pared (fig. 18)

$x + \Delta x$  = parte derecha en el elemento de la pared.

Además, de acuerdo con el teorema del valor medio tenemos: (Ver apéndice IV)

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x+\Delta x} = \left. \frac{dT}{dx} \right|_x + \left. \frac{d}{dx} \left( \frac{dT}{dx} \right) \right|_M \Delta x \text{ donde } M \text{ está}$$

entre  $x$  y  $x + \Delta x$ .

Sustituyendo esta última ecuación en la ecuación de conservación de energía, tenemos:

$$\dot{q} A \Delta x = -k A \left. \frac{d^2 T}{dx^2} \right|_M \Delta x$$

y ahora, dividiendo entre el elemento de volumen  $A \Delta x$ , y haciendo tender a cero éste, tenemos:

$$-k \frac{d^2 T}{dx^2} = \dot{q}$$

Ahora, para el caso de un cilindro,  $A = 2\pi r l$ .

donde  $l$  = largo del cilindro.

$A_{r+\Delta r} = 2\pi(r+\Delta r)l$  de modo que la ecuación de conservación de energía quedará así:

$$-KA_r \left. \frac{dT}{dr} \right|_r + \dot{q} / 2\pi r dr = -KA_{r+\Delta r} \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r+\Delta r}$$

$$\therefore \dot{q} r = -K \left( \frac{dT}{dr} \right) = \frac{dT}{dr} + r \frac{d^2 T}{dr^2}$$

que no puede ser integrada con facilidad debido a que  $K$  depende de la temperatura.

## APENDICE I

### CALCULO DEL PERFIL DE TEMPERATURA.-

Para calcular el perfil de temperatura, se ponen unos termopares en el refrigerante. Conociendo la conductividad de éste se puede calcular la temperatura externa de la vaina. Con esta temperatura y conociendo el flujo de calor a través del área unitaria, y la conductividad térmica, se puede calcular la temperatura interna de la vaina. En la interface comprendida entre la vaina y el combustible no pueden hacerse medidas experimentales, así que hay que hacer una estimación de la caída de temperatura.

Conociendo el coeficiente de transferencia de calor y la temperatura de la vaina y por supuesto la cantidad de calor que fluye por unidad de área, se puede conocer la temperatura de la superficie del combustible. El coeficiente de transferencia de calor, se calcula con la fórmula:

$$h = \frac{K_f}{c(R_1 + R_2) + g_1 + g_2} + \frac{K_m P}{a \sqrt{R} H} \quad \text{donde}^{14}$$

$K_f$  = conductividad térmica del fluido

$K_s$  = conductividad térmica del sólido

C = Constante

$$K_m = \frac{2K_1 K_2}{K_1 + K_2}$$

$R_1$  y  $R_2$  es la media aritmética de la altura de las asperezas de las dos superficies

$$a = a_0 \sqrt{R} \quad R = \sqrt{\frac{1}{2} R_1^2 + R_2^2} \quad a_0 = 1 \text{ cm}^{1/2}$$

$G_1$  y  $G_2$  son factores que se incrementan con la diferencia en el peso molecular del sólido y el gas y depende también de efectos de acomodación.

H = microdureza del sólido más suave.

P = presión interfacial.

Para el caso en que la vaina sea de Zircaloy, el coeficiente de transferencia de calor puede verse en función de la presión interfacial y a tres asperezas distintas para Helio, Argón, Kriptón, Xenón y vacío en la gráfica siguiente, figura 19

Con estos datos, ya podemos tener la temperatura del exterior del combustible.

Con esta temperatura, la conductividad térmica en función de la temperatura y con la cantidad de calor generado por unidad de volumen, podemos calcular el perfil de temperaturas en el combustible (la cantidad de ca-

lor generado por unidad de volumen por segundo, puede calcularse por calorimetría en el refrigerante, análisis de quemado u otros métodos).

Prácticamente, se procedió en la siguiente forma:

$$q = -K \frac{d^2 T}{dx^2} \quad \therefore \quad \frac{d^2 T}{dx^2} = \frac{-q}{K} \text{ en la superficie,}$$

conocemos  $K$  y  $q$  en la superficie, conocemos  $d^2 T/dx^2$ .

Además si hacemos el cambio de variable  $y = \frac{dT}{dr}$  (1),

$$\dot{q} r = -K \left( \frac{dT}{dr} + \frac{d^2 T}{dr^2} \right) \text{ quedará } \dot{q} r = -K \left( y + r \frac{dy}{dr} \right) \quad (2)$$

$$\text{así que} \quad \frac{dy}{dr} = \frac{d^2 T}{dr^2} = -\frac{\dot{q}}{K}$$

en la superficie es conocida de modo que (2) nos da  $y$  y como única incógnita, por lo tanto es despejada y conocida en la superficie. Con estos datos y con los coeficientes de Runge Kutta<sup>17</sup> calculamos el perfil de temperaturas.

Los datos fueron:

$$r = 1.8 \text{ cm} \quad q = 124 \text{ watts/cm}^2 \text{ ó } 1180 \frac{\text{watts}}{\text{cm}}$$

$$\text{flujo de calor} = 99 \text{ watts/cm}^2.$$

$$K^{15} = \frac{K_0}{T} + K T^3$$

## APENDICE II

Deducción de la fórmula, para la región en una esfera  $0 \leq r \leq a$  de conductividad  $K$  y la región exterior de conductividad  $K'$ .

K. La temperatura  $v$  tiende a  $V_z$  a distancias grandes.

$v = Vr \cos \theta + \frac{B}{r^2} \cos \theta$  donde  $r, \theta$  = coordenadas polares esféricas

$v' = Ar \cos \theta$   $v'$  es infinita cuando  $r \rightarrow 0$ ,  $v \rightarrow V_z$  cuando  $r \rightarrow \infty$

en  $r = a$ ,  $v = v'$ ,  $K' \frac{\partial v'}{\partial r} = K \frac{\partial v}{\partial r}$   $0 \leq \theta \leq \pi$

$$\therefore Va^3 + B = Aa^3 \therefore K(Va^3 - 2B) = K'Aa^2$$

Resolviendo para  $A$  y  $B$ ,  $v = \frac{Vr \cos \theta + Va^3(K-K') \cos \theta}{r^2(2K+K')}$

$$v' = \frac{3KVr \cos \theta}{2K+K'} = \frac{3KV_z}{2K+K'}$$

El gradiente de temperaturas en la esfera es  $\frac{3KV}{2K+K'}$  y si  $K' \ll K$ , el gradiente es  $\frac{3}{2} V$

### APENDICE III

TERMOPARES.- Durante el transcurso de este estudio, se estudió la manera de obtener temperaturas en lugares específicos de la pastilla de dióxido de uranio a partir del estudio del cambio de su estructura. Cuando se emplearon termopares se tomó en consideración que la temperatura máxima a la que un termopar puede ser usado está limitada por las fugas eléctricas a través del aislante y por reacciones químicas entre los materiales usados. Estas limitaciones básicas pueden tener importancia en un experimento.

Termopares de platino e iridio aislados con magnesio y forrados con inconel, han sido efectivos en la medida de las temperaturas sobre  $1400^{\circ}\text{C}$  pero a temperatura superiores al punto de fusión del inconel, hubo reacción y el termopar fue disuelto por el  $\text{UO}_2$ . A estas temperaturas, termopares de tungsteno y rhenio aislados con birilio y forrados con tantalio han sido parcialmente efectivos. Uno de éstos termopares funcionó entre  $1640$ - $1840^{\circ}\text{C}$  en un período de 8 horas pero dio muestras de falseo y luego se vio que había reaccionado con el combustible. Por otro lado, y aunque pruebas de laboratorio han indicado que el tantalio es compatible con

$\text{UO}_2$  en períodos cortos a  $2600^\circ\text{C}$ , los experimentos sugieren que puede ocurrir una reacción a  $1450^\circ\text{C}$ . Además el uso de termopares en un reactor, introduce nuevas fuentes de error que pueden ser muy importantes en el diseño de un experimento. Por lo tanto, deben tomarse en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) La fuerza electromotriz del termopar, deberá corregirse por las fugas a través del aislante por medio de la medida de la resistencia del aislante.
- b) Se ha observado que la calibración de algunos termopares se altera bajo irradiación. Aunque normalmente este efecto es pequeño, en algunos casos es importante.
- c) En algunas medidas usando tungsteno/rhenio una fuerza electromotriz fue detectada entre los alambres del termopar y la funda del combustible. Este alcanzó un valor máximo de 600 mV y en un caso se halló que la polaridad fue invertida cuando la temperatura de salida de un termopar excedió los  $2000^\circ\text{C}$ . Puesto que esta fuerza electromotriz fluctúa considerablemente en tanto que la salida del termopar cambiaba en forma continua y gradual, puede inferirse que la fuerza electromotriz no influye en la salida del termopar. Por lo tanto, mientras esta f.e.m. no se explique con claridad, la vali-

dez de las medidas del termopar son dudosas.

d) Los fuertes gradientes térmicos, normales en el  $\text{UO}_2$ , hacen la salida especialmente sensitiva a la posición del termopar. Cerca de la superficie del  $\text{UO}_2$ , el gradiente es usualmente de  $100\text{-}200^\circ\text{C/mm}$  y el termopar con su funda es de 1 a 2 mm de diámetro.

e) El termopar, se calienta absorbiendo radiación con el resultado de que su temperatura es mayor que la temperatura del  $\text{UO}_2$  que le rodea. Este error es minimizado si el contacto entre el  $\text{UO}_2$  y el termopar es bueno.

## APENDICE IV

De acuerdo con el teorema del valor medio,  $f(x)$  que es el valor de la función en  $x$ , está relacionada con  $f(x + \Delta x)$  que es el valor de la misma función en  $x + \Delta x$  en la forma

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \left. \frac{df(x)}{dx} \right|_{\text{en } M} \Delta x \quad \text{donde } M \text{ está}$$

localizada entre  $x$  y  $(x + \Delta x)$

Sea

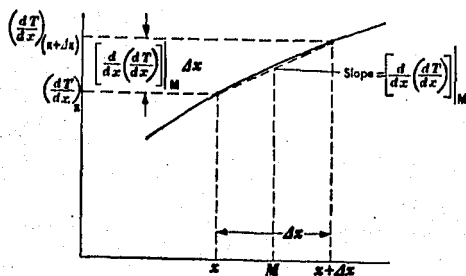
$\frac{dT(x)}{dx}$  el gradiente de temperaturas. Hagamos

$f(x) = \frac{dT(x)}{dx}$  entonces, el teorema del valor medio

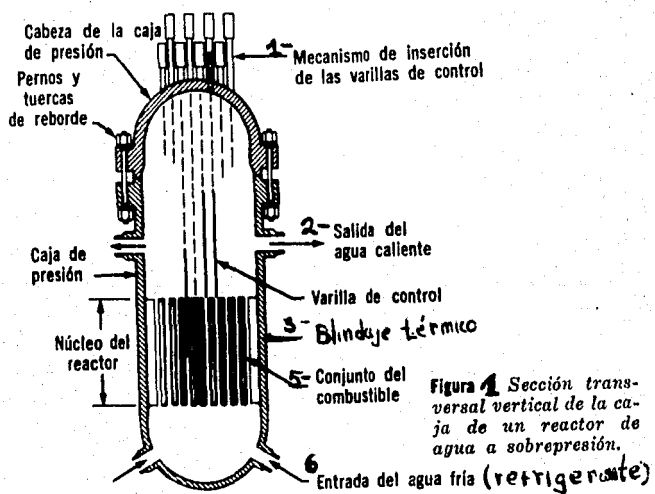
relacionará el gradiente de temperaturas en  $x$  y  $x + \Delta x$  así:

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{\text{en } (x + \Delta x)} = \left. \frac{dT}{dx} \right|_{\text{en } x} + \left[ \frac{d}{dx} \left( \frac{dT}{dx} \right) \right]_{\text{en } M} \Delta x$$

donde  $M$  está localizada entre  $x$  y  $x + \Delta x$  como ilustra la figura



Teorema del valor medio aplicado a la conducción  
de calor



**Figura 1** Sección transversal vertical de la cabeza de un reactor de agua a sobrepresión.

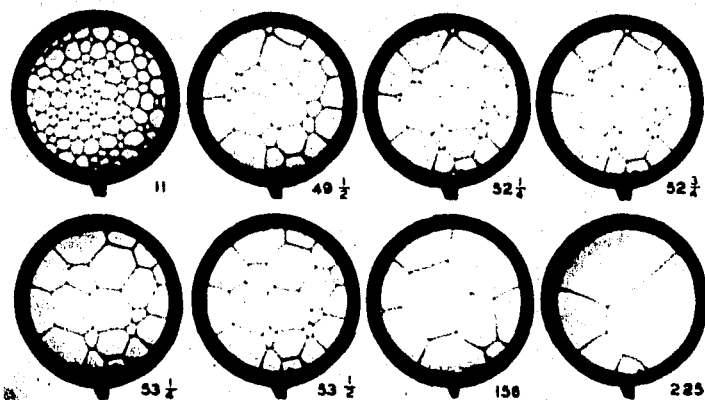


Figura 2

Crecimiento de las celdas de jabón en un recipiente plano.

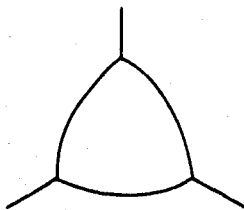


Figura 3 Croquis de una celda de jabón de tres lados. Obsérvese la curvatura pronunciada de los límites, que es cóncava hacia el centro de la celda

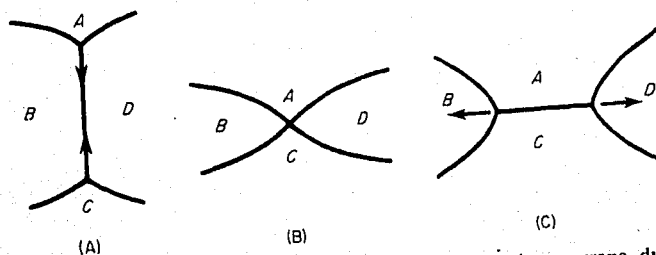
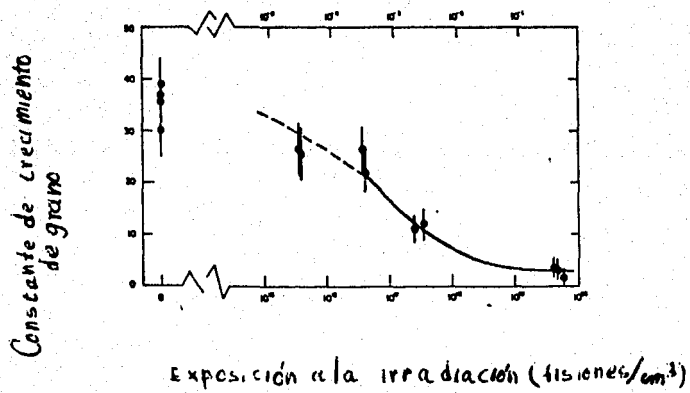
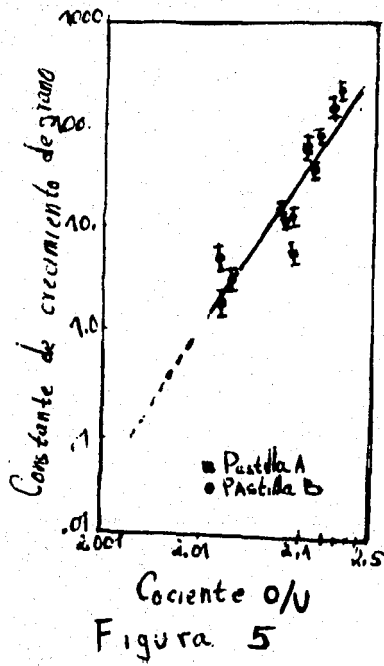


Fig. 2.1 Mecanismo que cambia el número de lados de un grano durante el crecimiento de grano



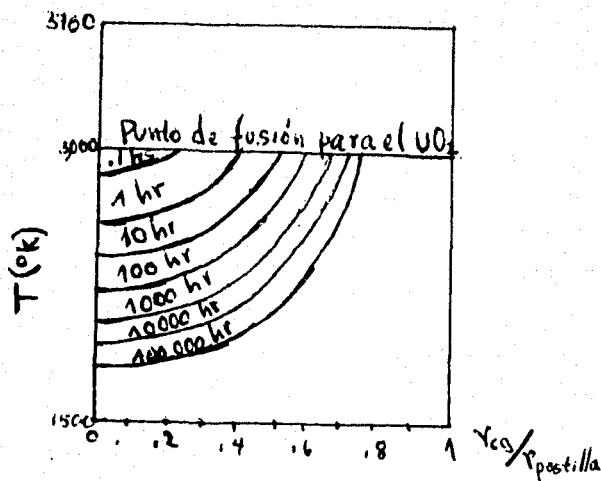


Figura 7  
Crecimiento de grano columnar puesto en forma fraccional para el  $UO_2$

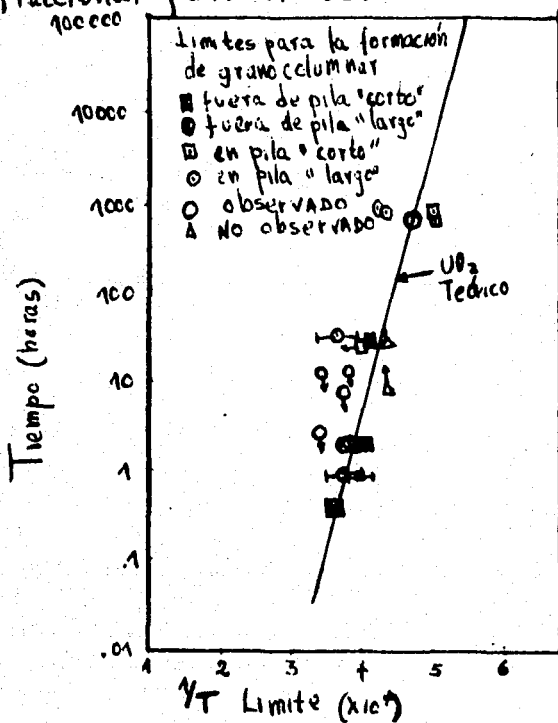
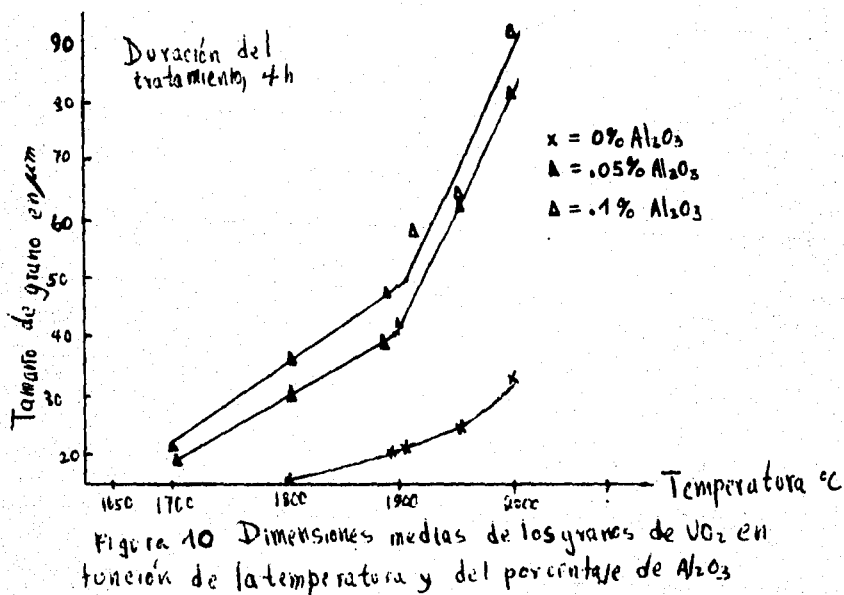
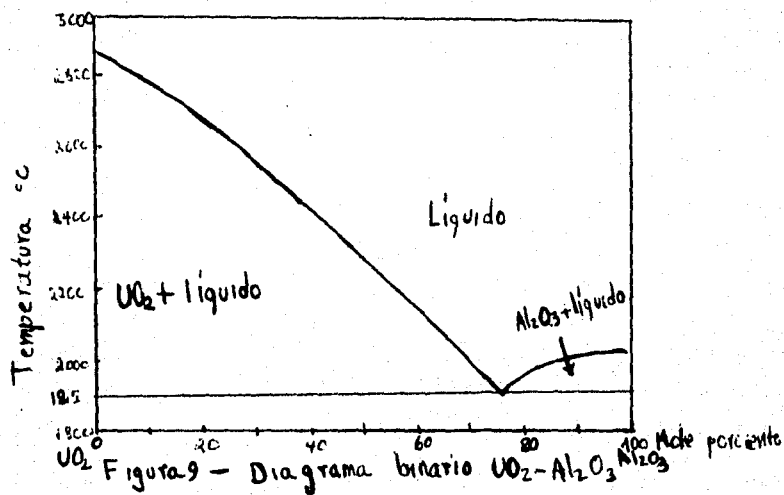


Figura 8.— Temperaturas centrales límites para el crecimiento de grano columnar en  $UO_2$



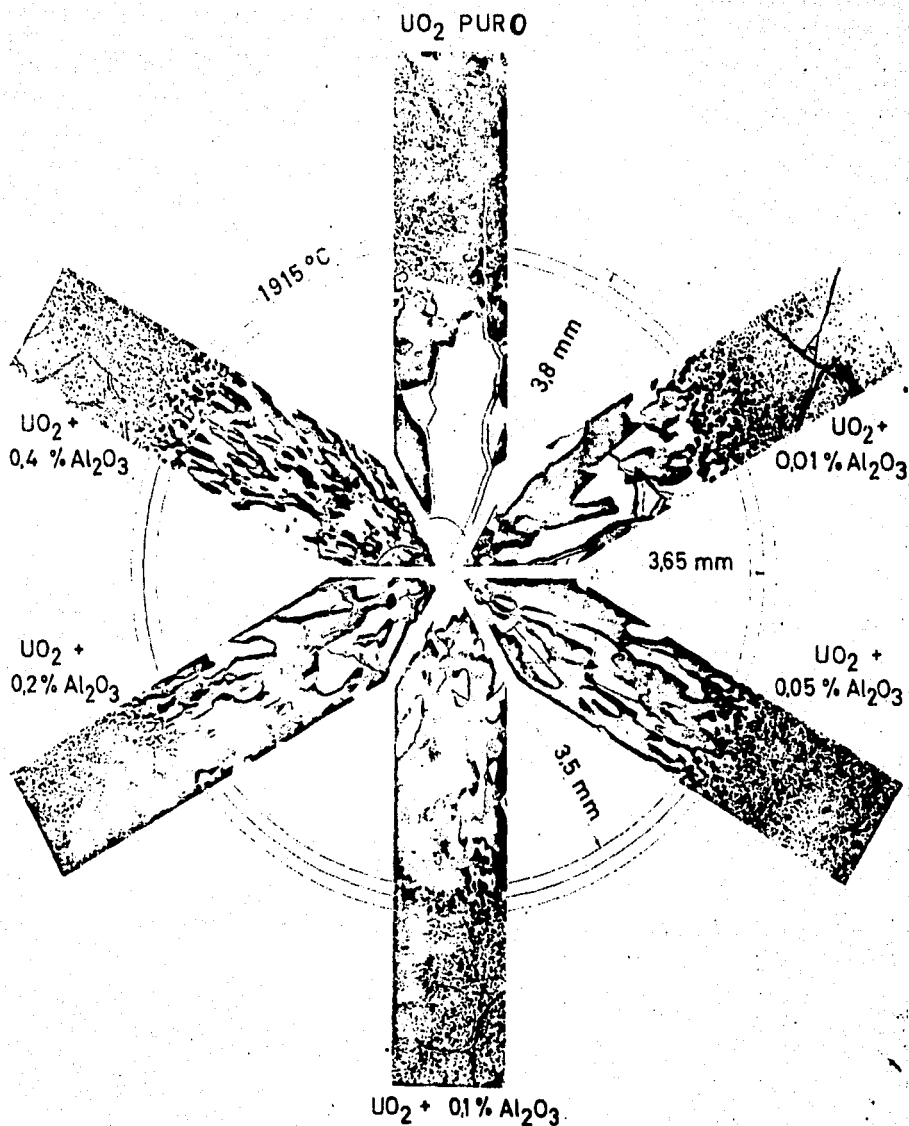


Figura 11—Influencia del porcentaje de alúmina en el radio eutéctico y en la estructura columnar.

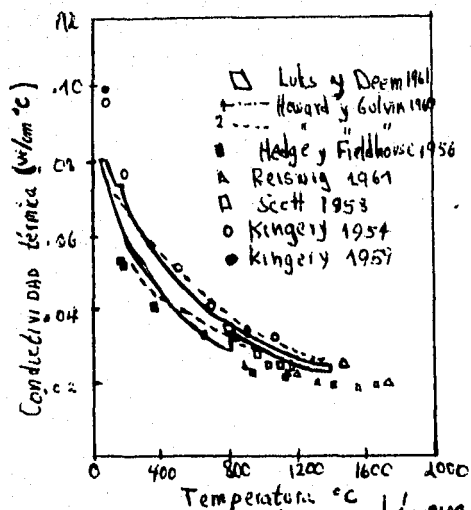


Figura 12 - Conductividad térmica de  $UO_2$  no irradiado, como función de la temperatura, comparación de los resultados de diferentes autores

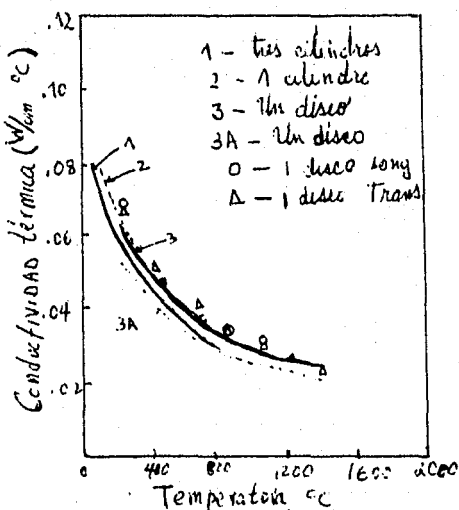


Figura 13 - Conductividad térmica de  $UO_2$  no irradiado como función de la temperatura, comparación de resultados de diferentes pastillas de Lucks y Deem.

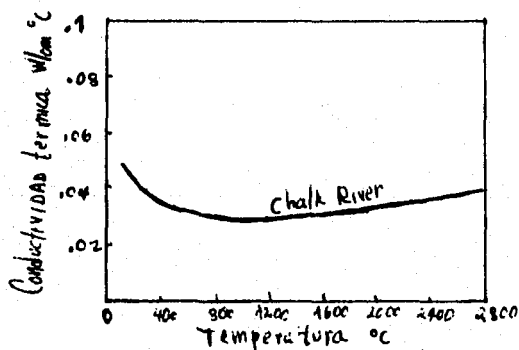


Figura 15 - Conductividad térmica del  $UO_2$  durante irradiación como función de la temperatura.

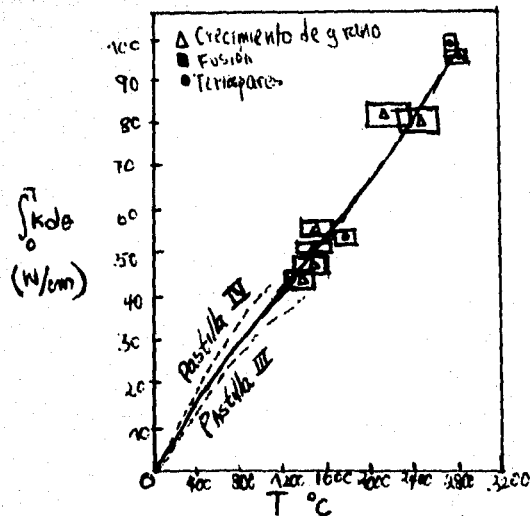


Figura 14 Conductividad integrada del  $UO_2$  durante la irradiación, como función de la temperatura central.

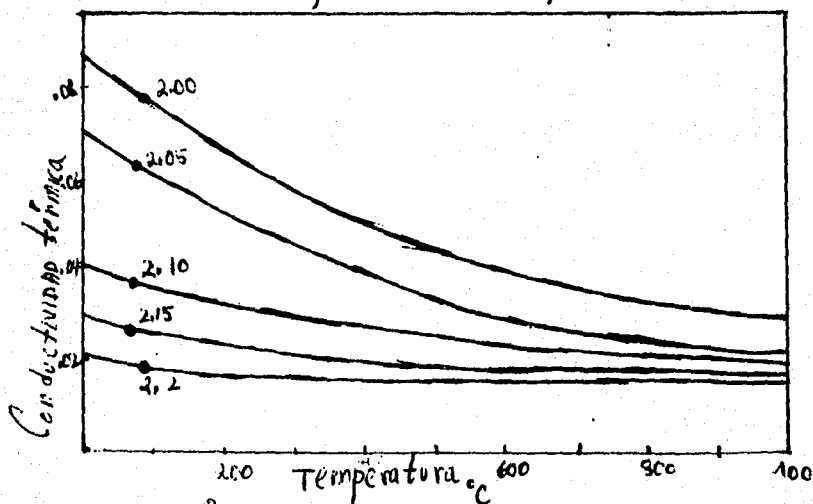


Figura 16 Conductividad térmica de  $UO_2$  no irradiado como función de la temperatura para  $UO_{2+x}$

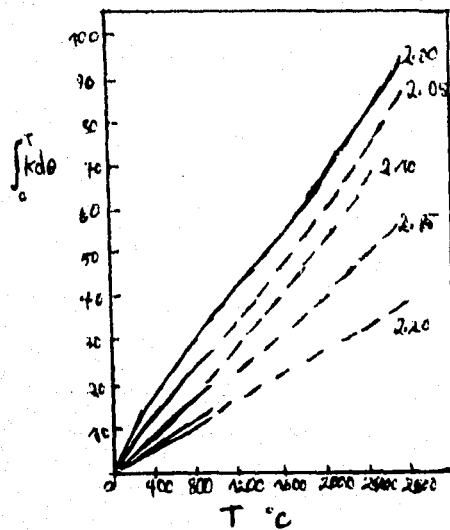


Figura 17.— Conductividad integrada de varias composiciones de  $\text{CO}_2$  durante la irradiación, como función de la temperatura máxima.

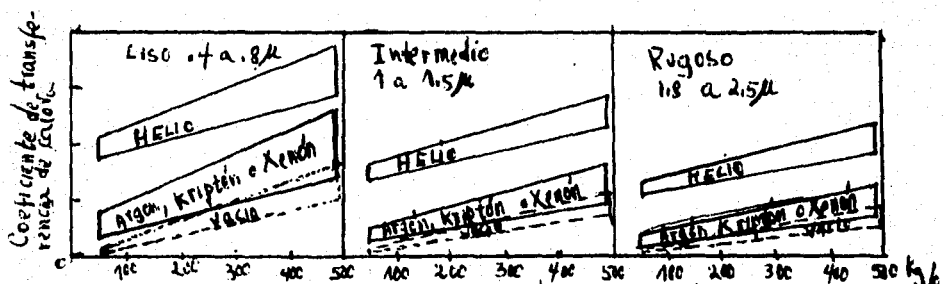


Figura 19.— Gráfica experimental de los coeficientes de transferencia de calor entre  $\text{CO}_2$  y Zircaloy. Temperatura interfacial,  $350^{\circ}\text{C}$

Radio en centímetros

Temperatura en °K

1.8

7 2 3

1.7

9 4 0

1.6

1 1 6 7

1.5

1 3 9 9

1.4

1 6 2 8

1.3

1 8 5 1

1.2

2 0 6 4

1.1

2 2 6 5

1.0

2 4 5 3

.9

2 6 2 5

.8

2 7 8 2

.7

2 9 2 2

.6

3 0 4 6

.5

3 1 5 2

.4

3 2 4 1

.3

3 3 1 1

.2

3 3 6 2

.1

3 3 9 3

.09

3 4 0 4

Tabla de valores del radio de la pastilla en relación con la temperatura

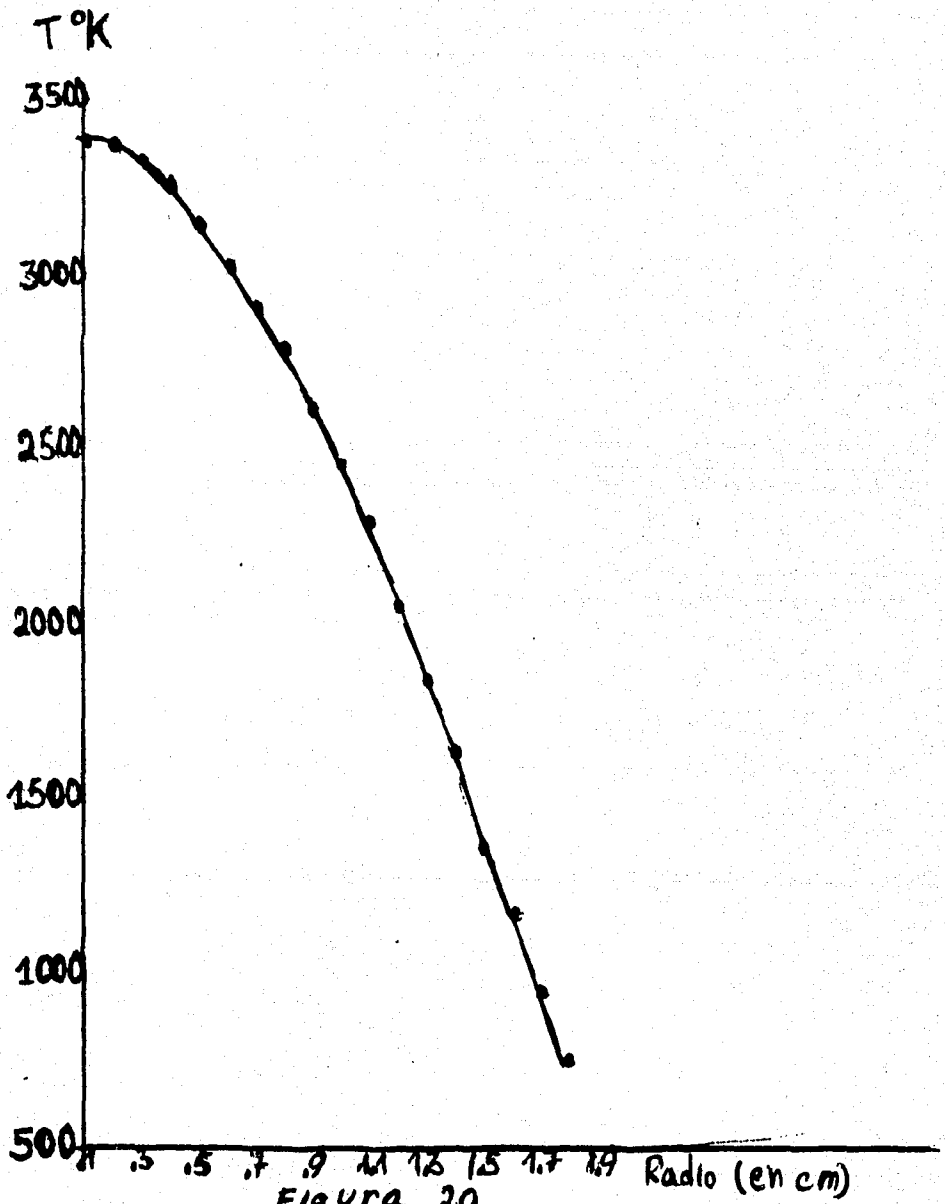


Figura 20  
Perfil de temperaturas de  $\text{CO}_2$

## REFERENCIAS

- 1- Reactores Nucleares. Comisión norteamericana de energía atómica. Departamento de información técnica.
- 2- Plowshare. Comisión de energía atómica de los EE.UU. División de información técnica.
- 3- Nuclear fuel. Westinghouse Electric Corporation. Nuclear Fuel División.
- 4- Principios de Metalurgia Física. Robert E. Reed. Hill.
- 5- Grain Growth in  $UO_2$  By J.R. Mac Swann and J. Hayaishi British Ceramic Society February 1967.
- 6- Lyons M F Coplin D H and Weindenbaum B "Analysis of  $UO_2$  grain growth. Data from out of pile experiments" EURAEC report 6EAP-4411, 1963.
- 7- Grain Growth in sintered uranium dioxide CRFD-99- by J.R. Mac Swann. Chalk River, Ontario January 1961.
- 8- Theory of columnar grain growth and central void formation in oxide fuel rods F. A. Nichols. Journal of nuclear materials 22 (1967) Submitted 14 september 1966; in revised form 27 January 1967.
- 9- Carslaw and Jeager. Conduction of heat in solids.
- 10- P. G. Shewmon Trans Met Soc.
- 11- Grain Growth in sintered Uranium Dioxide. II

## II

- Columnar Grain Growth by J.R. Mac Ewan and V.B. Lawson. Reprinted from the Journal of The American Ceramic Society, Vol 45 No. 1. January 1962.
- 12- Determination de la Temperature de fonctionnement d' un combustible irradie a l' aide de moniteurs disperses. Journal of nuclear materials 32 (1969).
- 13- Columnar Grain Growth in equiaxially heated. Urania based Sinters I Amato R.L. Colombo
- 14- Temperature distribution in  $UO_2$  fuel elements J.A. L. Robertson, A. M. Ross, M J. F. Notley and J.R. Mac Ewan. Journal of Nuclear Materials 7, No. 3 (1962).
- 15- J. L. Bates Nucleonics Junio 1967.
- 16- Propiedades y aplicaciones de la integral de conductividad térmica J Lartigue G. Revista Mexicana de Física Vol 21. 1972.
- 17- Computer applications of numerical methods. Shan S Kuo. Addyson Wesley.
- 18- Principles of heat Transfer 2d Edition. Frank Kreith.