

CNEA-AC-27/84

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
Gerencia de Protección Radiológica y Seguridad
MINISTERIO DE SALUD Y ACCION SOCIAL
Dirección Nacional de Saneamiento
UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
Facultad de Ingeniería

ASPECTOS DE SEGURIDAD EN EL DISEÑO
DE
ELEMENTOS COMBUSTIBLES

Ing. Roberto O. CIRIMELLO
Ing. Raúl L. OLEZZA

Apuntes para el Curso Post-grado en
Protección Radiológica y Seguridad Nuclear

BUENOS AIRES - ARGENTINA
1984

I DISEÑO DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES DE POTENCIA

A- Descripción del Elemento Combustible

- 1- Elemento Combustible de C.N.Atucha I
- 2- Elemento Combustible de C.N.Embalse.

B- Bases de Diseño

II ASPECTOS DEL COMPORTAMIENTO VINCULADOS CON LA SEGURIDAD

A- Comportamiento en Condiciones Normales

- 1- Cambios estructurales y de las principales propiedades físicas.
- 2- Comportamiento de los productos de fisión.

B- Comportamiento en Condiciones Anormales o de Accidente.

III LA CONSIDERACION DE SITUACIONES DE ACCIDENTE EN EL DISEÑO DEL COMBUSTIBLE.

I- DISEÑO DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES DE POTENCIA

A- Descripción del Elemento Combustible de Potencia.

Los Elementos Combustibles proveen el medio de introducir el material combustible en la cantidad y geometría requerida para el proceso de fisión. En ellos se genera el calor y se transfiere al medio refrigerante, a la vez proveen las dos primeras barreras (pastilla, vaina) a los productos de fisión.

Además protegen al material combustible de la reacción química con el refrigerante y mantienen la integridad mecánica del conjunto antes, durante y después de la operación en el reactor.

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 fisionable. 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 y 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 pastillas y vaina.

En la parte exterior del tubo se suele incorporar apéndices que sirven como espaciadores o patines deslizantes para apoyo entre barras combustibles o entre estas 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 mantiene su geometría por medio del uso de componentes estructurales tales como separadores, placas extremas y en algunos casos tubos estructurales.

Dentro de los reactores de uranio enriquecido, llamados también de núcleo abierto, las barras combustibles se ensamblan en conjuntos de geometría cuadrada. En los reactores de agua a presión (PWR) el número de barras es de 200 a 260 según se coloquen en arreglos de 15 x 15 ó hasta 17 x 17.

Estos ensambles están constituidos por "canastos" formados por dos piezas extremas de 7 ó 8 separadores intermedios unidos 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 estos EC es de aproximadamente 3,6 metros. Las BC no tienen apéndices 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 (PHWR) 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 los canales y la geometría más conveniente de estos es la cilíndrica.

En los reactores PHWR (Atucha) de núcleo vertical los EC son 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.

1- Elemento Combustible de la C.N. Atucha I.

Conjunto

La fig.1 muestra un esquema del EC completo, el cuerpo de relleno y el cierre al canal, los cuales están vinculados por un acople. El EC propiamente dicho comienza en la parte inferior del acople al cual están unidas 3 barras de acero que atraviesan el espacio del plenum de salida de refrigerante y 6 tubos de Zircaloy 4 lo hacen en el reflector superior. A continuación hay una placa portante de la que cuelgan 36 barras combustibles, un tubo portante de las zapatas elásticas de ajuste del EC al canal y 14 separadores rígidos y uno elástico inferior.

El mantenimiento de la posición y tolerancia de las barras combustibles a lo largo del elemento se logra por medio de los separadores, el último de los cuales adosado un sistema de apoyo elástico para prevenir el efecto de las vibraciones inducidas por la circulación de refrigerante.

El vínculo entre las barras combustibles y los separadores se verifica por medio de patines deslizantes fijos a la vaina. Nueve barras combustibles de la corona exterior tienen un encastre en los patines deslizantes para fijar en la posición axial los separadores. El resto puede deslizarse para permitir dilataciones diferenciales. El extremo inferior del elemento es libre por la misma razón.

El posicionado del elemento combustible en el canal se efectúa por medio de zapatas fijas a los separadores y las zapatas elásticas. A fin de mejorar la performance vibracional del EC y prevenir problemas de desgaste a partir del tercer y cuarto núcleo, los EC llevan un separador más, se agregó una zapata elástica tangencial en el último separador y se acortó el EC en 150 mm para alejar el extremo inferior de las toberas de entrada de refrigerante. El acortamiento se hizo a expensas del espacio para gases de fisión inferior (70 mm) y 80 mm del varillaje.

Acople

Se usa como unión del elemento combustible y el cuerpo de relleno y entre este y la pieza que lleva el cierre al canal. Cada acople consiste en dos cilindros, llamados parte superior e inferior separados por una superficie inclinada a 15°. Cada parte del acople lleva un medio anillo fijado por tornillos, que encajan en estado acoplado en una entallada circular de cada parte del acople.

Durante el acoplamiento ambas partes deslizan radialmente hasta coincidir exactamente en sentido axial. Lleva un seguro, que impide el desacople, consistente en un perno o pasador que está alojado en la parte superior y desliza por presión de un resorte, hacia abajo. El pasador tiene a su extremo in-

ferior un cono de 30° que calza en un agujero cónico de la parte inferior del acople, con una excentricidad de 1 mm. Esta excentricidad radial sirve para ajustar ambas partes del acople, una contra otra. La parte cónica del acople impide el desacople, ya que quedan dos superficies a 90° (la del cono y la interface de los dos cilindros) que además previene el juego axial.

Barra Combustible

Está constituido esencialmente por una columna o apilamiento de pastillas de dióxido de Uranio sinterizado, envainadas en un tubo de zircaloy con tapones soldados en sus extremos. Además lleva distribuidos a lo largo de la columna de pastillas 29 arandelas deformables para absorber la dilatación térmica de la misma en la primer salida en potencia, dos espacios, uno en cada extremo, para alojar gases de fisión, y algunos elementos para absorber dilatación térmica.

Las altas temperaturas que se establecen en el UO_2 hacen que las dilataciones térmicas sean considerables. Por otra parte el salto térmico entre la pastilla y la pared interior de la vaina es importante por cuanto está lleno con gases nobles (He al comienzo y mezcla de He, Xe y Kr luego).

Estos hechos hacen necesario definir un espacio entre pastilla-vaina adecuados como para tener la mínima deformación de la vaina por dilatación térmica del UO_2 compatible con una menor temperatura central.

En este caso el espacio diametral (diámetro interno de vaina-diámetro de pastilla) varía entre 0.13 y 0.23 mm ya que los diámetros correspondientes son 10.80 ± 0.04 y 10.62 ± 0.01 respectivamente, lo cual asegura una deformación plástica efectiva de la vaina inferior a 1% durante todo el tiempo de permanencia y una temperatura central de UO_2 inferior a $2200^\circ C$, para 100% de potencia. Durante el proceso de fisión se producen productos de fisión gaseosa que se liberan de las pastillas de UO_2 por efecto térmico, principalmente.

Estos gases se incorporan a los espacios libres dentro de la

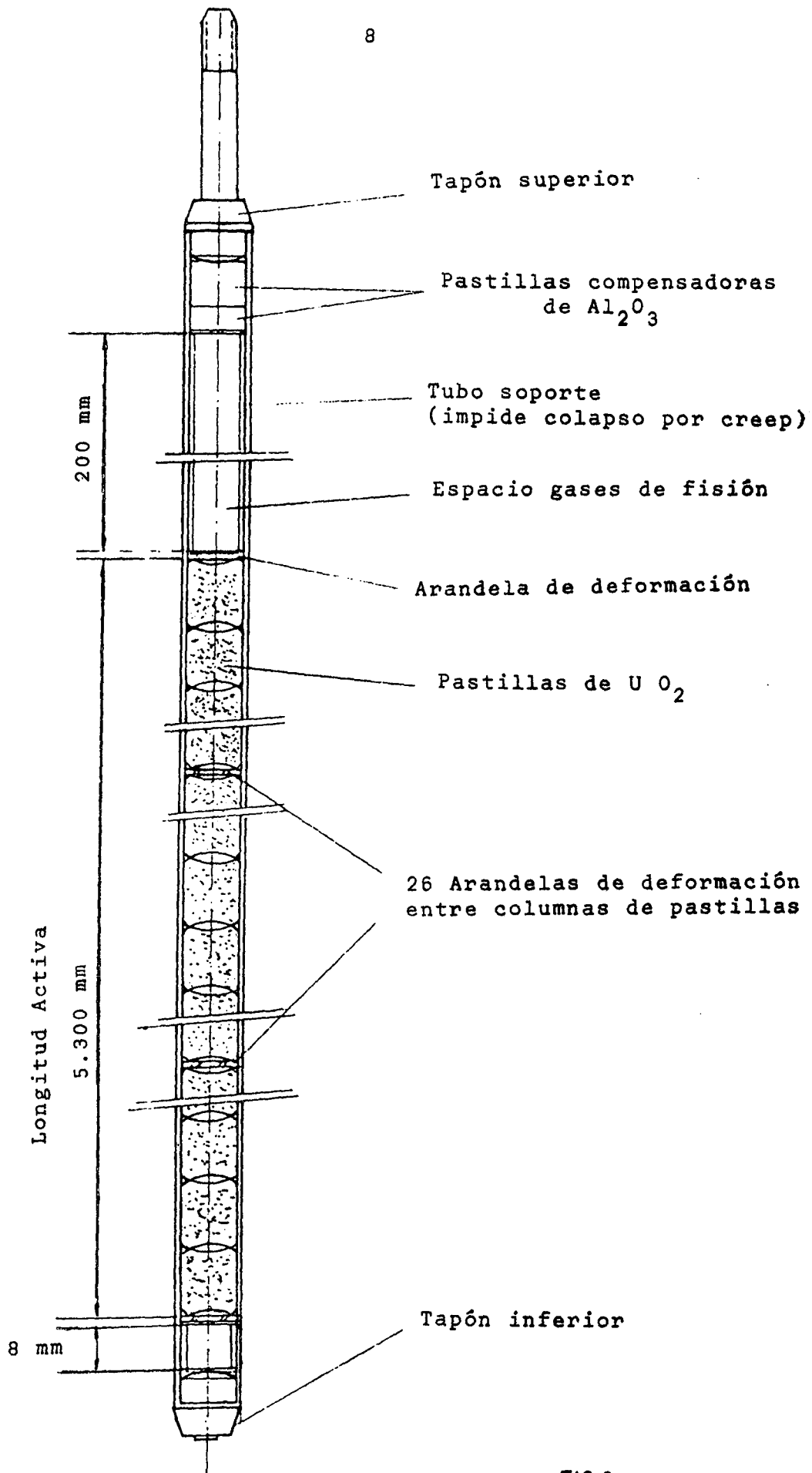


FIG. 2

vaina, aumentando la presión interior.

Por otra parte, y a fin de disminuir las presiones circunferenciales en la vaina por diferencia de presiones exterior (refrigerante) e interior, se incorpora al fabricar la "barra combustible" una presión de 17 atm a 1 TN de He.

A fin de contener estos gases de fabricación y de fisión y no sobre pasar la presión exterior al final del tiempo de permanencia (criterio de diseño) se prevén 2 espacios en los extremos de la vaina (zona de menor temperatura) para alojarlos.

En el caso de las barras combustibles de la CNA, tienen un espacio superior de 20 cm³ y otro inferior de 8 cm³.

Ambos espacios están protegidos con sendos tubos para prevenir el aplastamiento de la vaina, instantáneo o diferido, por efecto de la presión exterior.

El efecto de gradiente de temperatura radial hace necesario prever una concavidad en las caras planas de las pastillas de UO₂. De tal manera que la elongación de la columna de pastillas se minimiza, al ser transferido el punto de contacto entre pastillas a la zona de menor temperatura (Figura a.)

Teniendo en cuenta además que la dilatación de la columna de pastillas es mayor que la de la vaina es necesario prevenir un alargamiento excesivo de la vaina.

Para ello se han colocado arandelas aplastables repartidas entre la columna de pastillas de tal manera que absorban la dilatación diferencial mencionada.

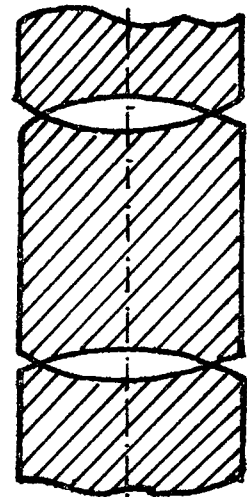


Fig.a. Diseño pastilla UO₂

A fin de prevenir rotura de las pastillas de UO₂ durante el transporte, se colocan elementos (pastillas de Al₂O₃) que compensan las tolerancias longitudinales y permiten cerrar la "barra combustible" sin juego interno.

La longitud activa es de 5.300 mm de la cual aproximadamente

50 mm corresponden a las arandelas aplastables.

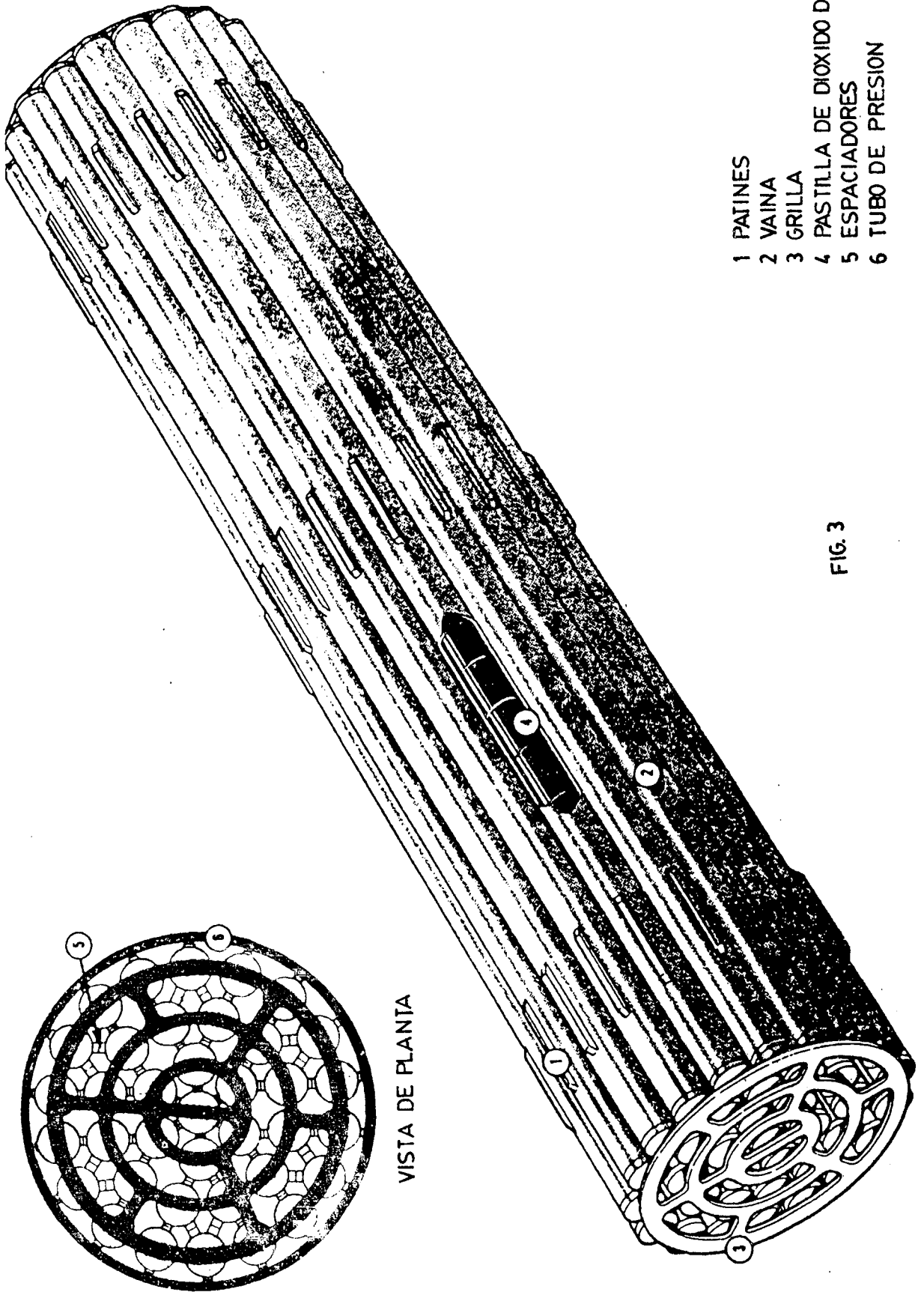
2- Elemento Combustible Central Nuclear Embalse

Aproximadamente 30 pastillas de UO_2 están encapsuladas en una vaina de Zircaloy-4 de 0.4 mm de espesor (cuya cara interna lleva un recubrimiento de grafito de aproximadamente 0.01 mm de espesor) cerradas en sus extremos con tapones también de Zry-4 soldados por resistencia.

Treinta y siete barras combustibles están soldadas a dos grillas extremos para formar el elemento combustible que se muestra en la Figura 3.

Las barras combustibles están separadas una de otras en el plano medio del EC. por espaciadores fijos en las vainas por "brazing".

Las barras combustibles externas llevan adosados patines que permiten el deslizamiento dentro del tubo de presión.



- 1 PATINES
- 2 VAINA
- 3 GRILLA
- 4 PASTILLA DE DIOXIDO DE URANIO
- 5 ESPACIADORES
- 6 TUBO DE PRESION

FIG. 3

VISTA DE PLANIA

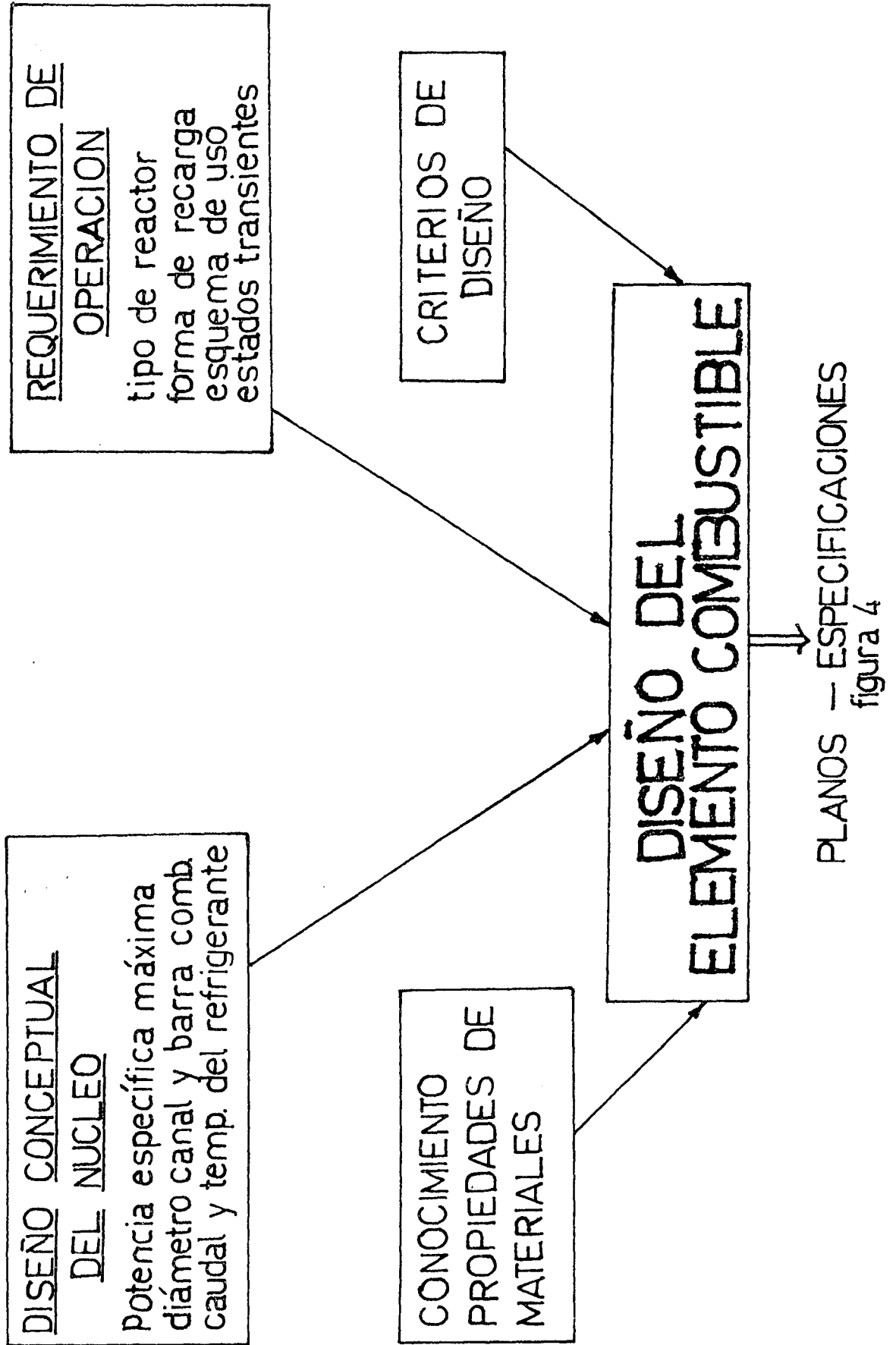
B- Bases del Diseño

En la fig.4 se esquematiza el flujo de información básica necesaria para proceder al diseño del elemento combustible, el que queda definido por un conjunto de planos, y de especificaciones relativas a los materiales y al elemento.

Los criterios principales, a los que debe ajustarse un diseño dado, se resumen en la fig.5.

Las figuras 6, 7 y 8 señalan los objetivos fundamentales que el diseñador de combustible debe plantearse alcanzar.

Dada la importancia que reviste la vaina en lo que hace a la seguridad, puesto que la función primordial es contener al material combustible y a los productos de fisión, lo que implica que debe mantener su integridad por lo menos durante todo el período de operación del elemento en el reactor, entre otros requerimientos, se ha considerado de interés listar las principales propiedades a tener en cuenta en la especificación de la misma fig.9.



CRITERIOS DE DISEÑO

—TEMPERATURA CENTRAL DE LA PASTILLA
MENOR QUE TEMPERATURA DE FUSION
DEL MATERIAL COMBUSTIBLE (UO_2)

—TEMPERATURA DE LA VAINA INFERIOR A
350°C

—DEFORMACION PLASTICA EQUIVALENTE
MENOR QUE EL 1 Ó 1,5%

—FLUJO CALORICO INFERIOR AL CORRES-
PONDIENTE A LA CONDICION DE SECADO

DISEÑO DE LA VAINA

MAXIMIZAR: M{UO_2}/M_{ZrO_2}

_MINIMIZAR: CORROSION Y ABSORCION DE
HIDROGENO

_MINIMIZAR: DEFORMACION (PCI)

_MINIMIZAR: RESISTENCIA TERMICA

_ASEGURAR RESISTENCIA MECANICA

DISEÑO DE LA PASTILLA

MAXIMIZAR $M{\text{UO}_2} / M_{\text{ZrO}_2}$

_MINIMIZAR LOS CAMBIOS DE VOLUMEN

_LIBERACION ACEPTABLE DE PFG

_PRODUCCION ECONOMICA

DISEÑO ¹⁷ DE LA BARRA

_ASEGURAR RETENSION PF

_ASEGURAR: PRESION INT. < PRESION EXT.

_PROVEER INTERFASE CON EL:

- SISTEMA DE RECAMBIO
- CANAL DE REFRIGERACION

fig.8

PRINCIPALES PROPIEDADES DE LA VAINA

_COLAPSO INSTANTANEO

_TENSION DE FLUENCIA

_TENSION DE ROTURA

_DEFORMACION UNIFORME

_REDUCCION DE AREA Y ESPESOR A
ROTURA

_VELOCIDAD DE CREEP

_RESISTENCIA A LA FATIGA

_TEXTURA

_ORIENTACION DE HIDRUROS

II - ASPECTOS DEL COMPORTAMIENTO VINCULADOS CON LA SEGURIDAD

El combustible responde a las diferentes solicitudes que se le imponen durante su permanencia en el reactor, con un comportamiento, que arbitrariamente puede clasificarse, en condiciones normales u ordinarias y en condiciones de extrema exigencia, anormales o de accidente, debiendo el diseño tener en cuenta a ambos.

El primero se refiere al que resulta de situaciones que se producen como consecuencia de la operación normal del reactor con estados de régimen y transientes (paradas, arranques y variaciones de potencia). El segundo, está referido a circunstancias especiales donde se alcanzan situaciones límites con riesgos cierto a que escapen de control, tal como puede ser una pérdida total o parcial del fluido refrigerante.

A continuación se describen brevemente los fenómenos y los mecanismos propuestos para interrelacionarlos, que se encuentran más vinculados con aspectos relativos a la seguridad, en ambos tipos de comportamiento.

A- Comportamiento en Condiciones Normales

1 - Cambios estructurales y de las principales propiedades físicas.

a) Temperatura Central de UO_2 .

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 gra

no 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 vuelve a aumentar por la oxidación durante el proceso de quemado.
- El hinchado del material combustible mejora la transferencia térmica por la presión de contacto pastilla-vaina.
- La formación de óxidos en la matriz de combustible 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 un lenta subida.

El estado de la pastilla recién fabricada muestra

una porosidad fina y gruesa uniformemente distribuida en la sección transversal.

En el tiempo cero de irradiación y a potencia de régimen (aprox. 500 w/cm) se observa la formación de fisuras debidas a la tensión térmica por el gradiente radial.

Estas fisuras tienen su punta en el centro y se abren hacia el borde de las pastillas.

El gap se ha cerrado parcialmente por la dilatación térmica de la pastilla.

Después de un quemado muy bajo (1 MWd/Tn) aparece ya el canal central que se produce por la migración de poros y a la vez se observa la formación de una zona de crecimiento de grano columnar y un pequeño anillo ó zona de granos equiaxiados.

Al bajar la potencia y con unos 10 MWd/Tn aparecen ahora fisuras cuyas puntas están hacia el borde. Las mismas se deben al efecto de contracción de la pastilla. Ha disminuido la porosidad de la zona externa de la pastilla.

A la misma potencia de trabajo y ahora con unos 100 MWd/Tn de quemado se completa el cierre del gap, hay crecimiento de grano y continúa agrandándose el canal central.

Comienzan a cerrarse las fisuras debido al hinchado (1000 MWd/Tn) lo cual se completa a los 10.000 MWd/Tn quemado máximo de los combustibles de Uranio Natural.

Este tipo de fenómeno es más notable en combustible de densidad baja 85-90% de la teórica aunque se observa también en combustibles de alta densidad (96% DT).

2- Comportamiento de los productos de fisión

Considerando su comportamiento químico en el combus-

tible, 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: Rh, 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 óxido: 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 puede 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 equiaxiado que contienen las fases de productos de fisión oxidados.
- Los precipitados metálicos son encontrados en la zona de granos columnares. Especialmente el Ru puede ser identificado por autorradiografía, ya que él 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 tienen por el contrario una más indirecta influencia, siempre que la distribución de temperatura quede determinada con certeza.

a) Liberación de gases de fisión.

La temperatura es el parámetro dominante que controla el proceso de liberación de gases de fisión.

A bajas temperaturas los átomos pueden ser expulsados de la superficie del combustible por choque y retroceso, debido a eventos de fisión adyacentes. Este efecto es importante cuando se considera la liberación de nucleídos de vida corta, pero es despreciable para el caso de gases estables.

La secuencia del fenómeno de liberación de gases de fisión puede resumirse como sigue:

- i) los gases difunden (atómicamente o en burbujas) a través del grano. El tamaño y distribución de burbujas está controlada por resolución inducida por irradiación.
- ii) los átomos alcanzan el borde de grano y precipitan en burbujas que crecen hasta interconectarse.
- iii) adicionalmente las burbujas y los bordes de granos migran absorbiendo gas de los granos.
- iv) subsecuentemente se forman túneles en los bordes de grano y el gas migra a las fisuras y al plenum en las barras combustibles.
- v) después de períodos a alta potencia el gas es liberado en las paradas del reactor, a causa de que se forman fisuras por contracción térmica que interceptan los túneles o burbujas

de gas.

Los modelos que se usan para describir este fenómeno tienen en cuenta:

- difusión de gas
- crecimiento de grano equiaxiado
- movimiento de borde de grano
- tamaño de la burbuja
- migración de burbujas a borde de grano
- formación de túneles

En forma muy aproximada puede decirse que una variación de potencia de 480 a 550 w/cm modifica la liberación de 3 al 10%.

De la misma manera y considerando que el tamaño usual de los granos obtenidos en fabricación es aproximadamente de 10 μm un aumento de este tamaño inicial de 50 μm reduciría la liberación en un 1% para una potencia lineal de 500 w/cm y quemados de 8000 MWd/Tn.

b) Liberación de productos de fisión volátiles.

Como se ha mencionado antes se incluyen en esta categoría a los elementos de alta tensión de vapor: Rb, Cs, Te, Br, I.

Estos elementos forman óxidos inestables que migran a las zonas frías de la pastilla.

La importancia tecnológica de estos elementos radica en que constituyen la fuente de radioactividad más importante a detectar cuando fallan los elementos combustibles y además porque el Iodo (y probablemente el Cs y Cd) son agentes sensibilizantes del fenómeno de corrosión bajo tensiones en el Zircaloy).

Una aproximación muy simple (pero razonable) es suponer que la fracción de PFV (Productos de fisión volátiles) es igual a la de gases de fisión (Xe, Kr).

El comportamiento de los productos de fisión volátiles puede resumirse como sigue:

- Las barras combustibles que operan a bajas poten-

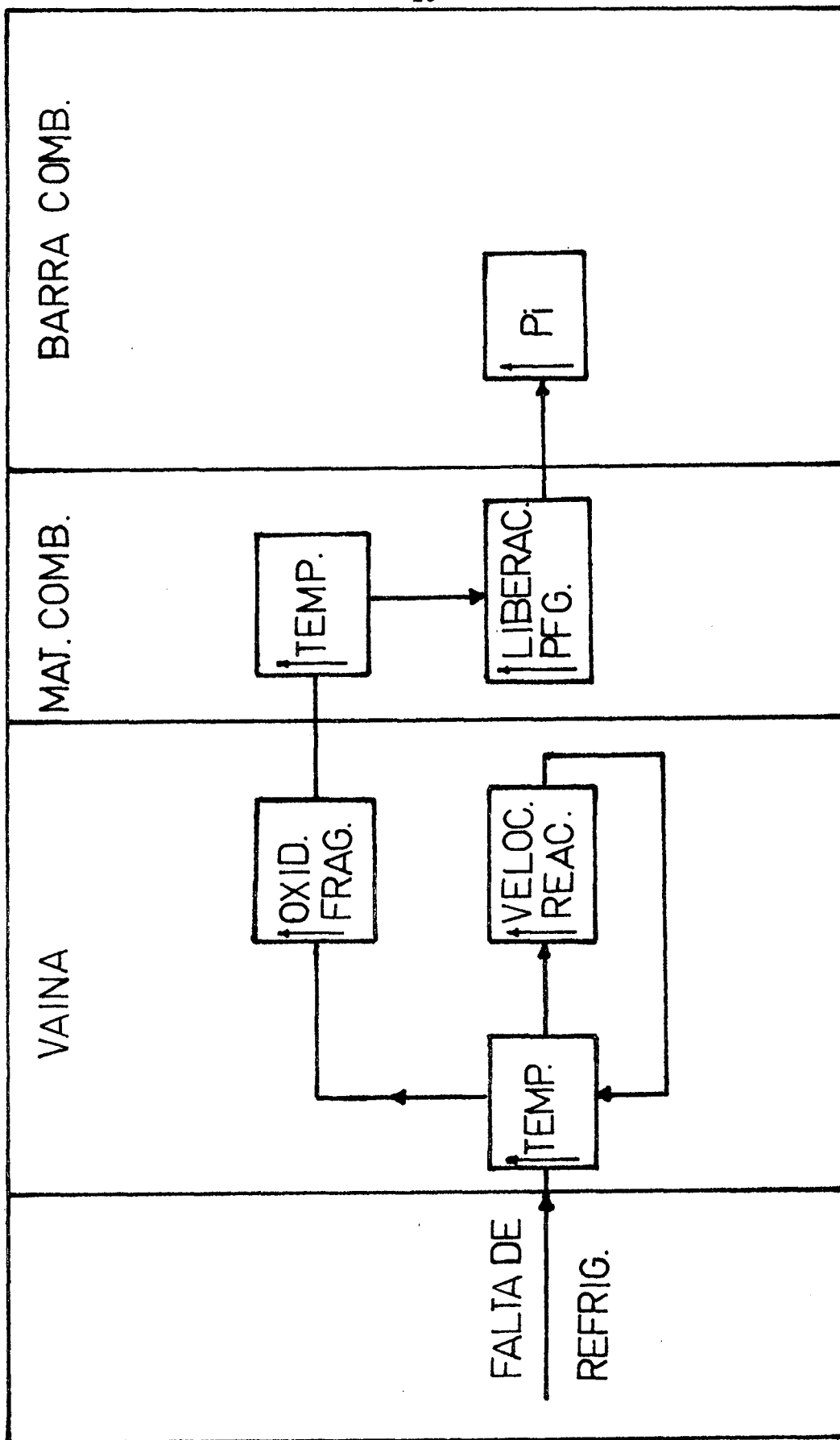


fig.10

cias ($q < 250 \text{ w/cm}$) no muestran liberación de PFV al gap.

- La migración axial y radial se produce a altas potencias y no se ha observado presencia de PFV en el plenum de gases de fisión.
- La liberación de PFV ocurre cuando la temperatura en el combustible excede la de crecimiento de grano.

B- Comportamiento en Condiciones Anormales

Una condición límite, es la que se origina por reducción parcial o eliminación de la refrigeración del combustible, LOCA, (Loss of Coolant Accident).

Esta circunstancia producirá la entrada en operación del sistema de Refrigeración de Emergencia (ECCS) del reactor, a fin de evacuar el calor residual y el proveniente del decaimiento de los PF (productos de fisión).

En la figura 10 se ha esquematizado la secuencia de los principales eventos que ocurren en el combustible, el generarse tal situación.

La falta de refrigeración provoco: 1) un aumento de la temperatura del combustible y por consiguiente una mayor liberación de PFG (productos de fisión gaseosos).

2) un aumento de la temperatura de vaina, lo que lleva a que la reacción



se acelere, y puesto que es exotérmica, se traduce en un mayor aumento de temperatura de la vaina.

Esto incrementa su oxidación y el grado de fragilización por el oxígeno que en ella difunde, apareciendo un sistema ternario ZrO_2 ; O_2 en $\text{Zr} (\alpha)$ y O_2 en $\text{Zr} (\beta)$, (α es la fase estable del circonio

por abajo de los 825°C), que afecta negativamente la resistencia mecánica y la ductilidad.

El estado de tensiones de la vaina pasa de ser compresivo (presión del refrigerante mayor que la interna de la barra), a un estado de tracción, al incrementarse la presión interna.

Además la formación del hidrógeno puede llegar a constituir un problema cuando su concentración llega a la mezcla explosiva.

Los parámetros controlantes son:

- Presión interna
- Presión externa
- Velocidad de calentamiento

los cuales determinan el grado de deformación de la vaina sobrecalentada hasta que la presión interna es liberada por rotura o recomienza el enfriamiento por el ECCS ($\Delta t_s \sim 2$ a 30 seg).

Los factores contribuyentes son:

- Irradiación previa del combustible
- No uniformidad del espesor de pared de vaina
- Velocidad de deformación (o dT/dt)
- Transformaciones alotrópicas en la vaina
- Grado de fragmentación del combustible antes y durante el LOCA.
- Grado de reubicación de pellets durante rotura.
- Oxidación e hidruración de vaina.
- Gradiente azimutal de T° en la BC.

La figura 11 esquematiza la evolución de la temperatura de la vaina-línea de puntos y de la presión interna de la barra-línea llena- para una dada velocidad de calentamiento.

La temperatura de la vaina comienza a elevarse desde el valor de operación nominal (valor de diseño), a partir del momento en que se abandona la operación en condiciones normales, tiempo cero en el gráfico.

Por encima de los 700°C, punto indicado como (1), la consecuente deformación de la vaina, expansión, se incrementa rápidamente, lo que produce la paulatina obstrucción del canal, hasta que ocurre la rotura de la vaina, con la consiguiente liberación de productos de fisión y disminución de la presión interna.

La presión interna va aumentando con el tiempo por efecto del incremento de la temperatura, luego decrece al aumentar el volumen interno a causa de la dilatación de la vaina, y finalmente se reduce drásticamente en el momento de la rotura.

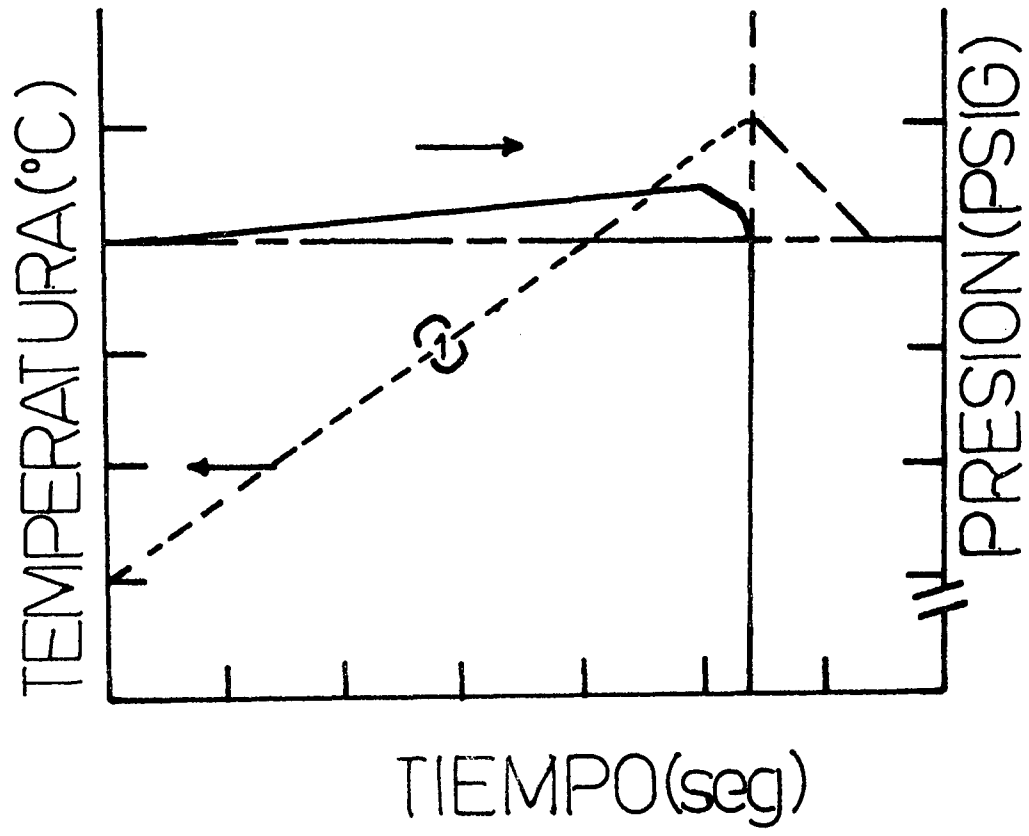


fig.11

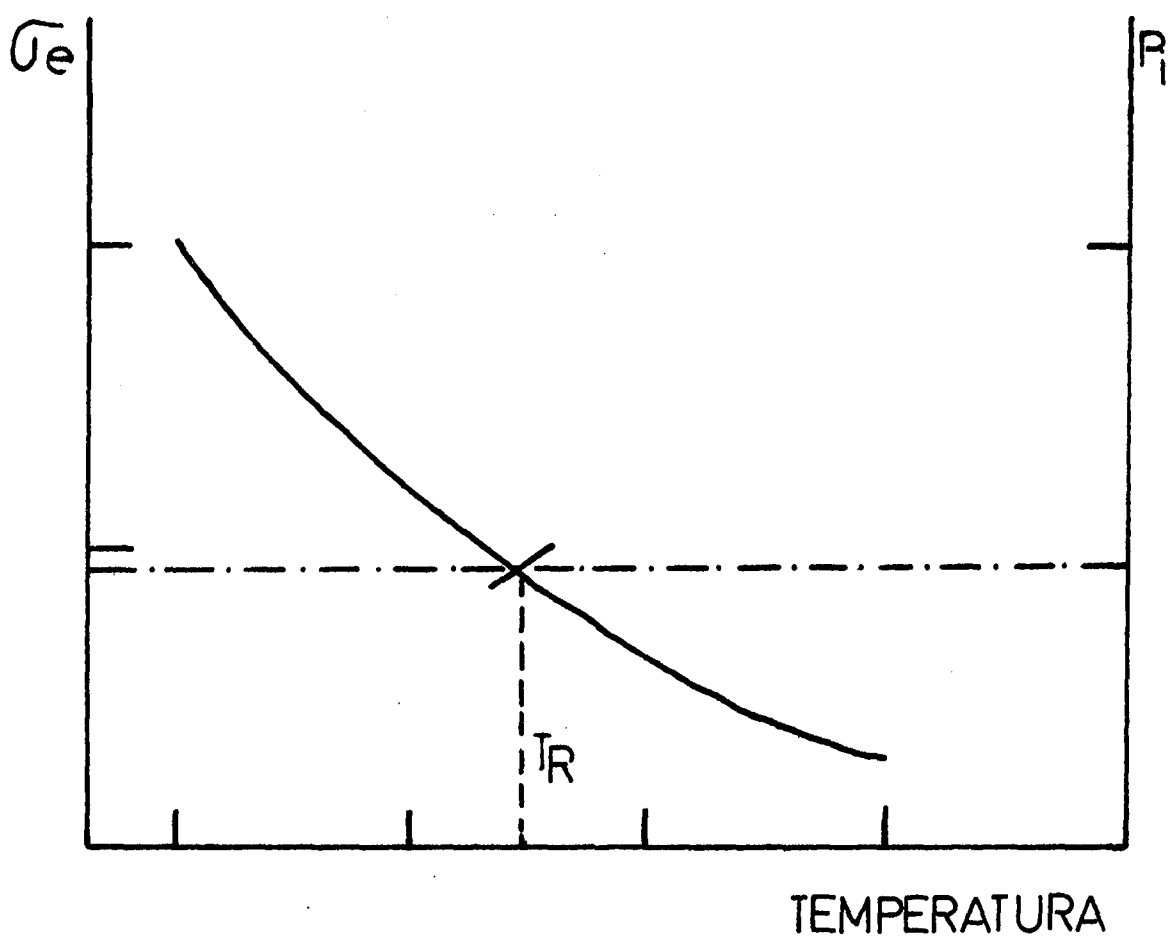


fig.12

En la fig.12 se ha graficado la tensión en la vaina (σ_e) y la presión interna (p_i), que producen la ruptura de la vaina a una temperatura (T_R).

Naturaleza de las fallas

- Hinchado antes de la rotura restringido al área de penetración.
- Ancho rango de bloqueo del canal de refrigeración.
- Un grado de azar en la posición de la ruptura de máxima deformación.
- La expansión máxima ocurre dentro de los 10 cm del plano axial medio.
- Los separadores tienden a reducir la posición aleatoria axial de rotura y a incrementar bloqueo del canal.
- Temperatura umbral de hinchado de la vaina $\sim 700^\circ\text{C}$.
- La exposición de la vaina al vapor a 1100°C por 8 minutos resulta en un comportamiento frágil a 500°C y menor.

Un bosquejo de las características de las fallas, para diferentes condiciones, se esquematizan en la fig.13, indicándose los rangos de deformación correspondientes.

III - LA CONSIDERACION DE SITUACIONES DE ACCIDENTE EN EL DISEÑO DEL COMBUSTIBLE

El diseño de la barra combustible debe considerar aspectos no solo vinculados con el comportamiento en condiciones de operación normal, sino que también debe tener en cuenta aquellos que deriven de probables condiciones de accidente.

La seguridad o economía de operación del reactor no serán adecuadas si un número apreciable de barras falla o si su vida queda apreciablemente reducida, como resultado de una situación de accidente.

La definición de los valores adecuados de los parámetros de diseño, implica verificar la capacidad de la barra

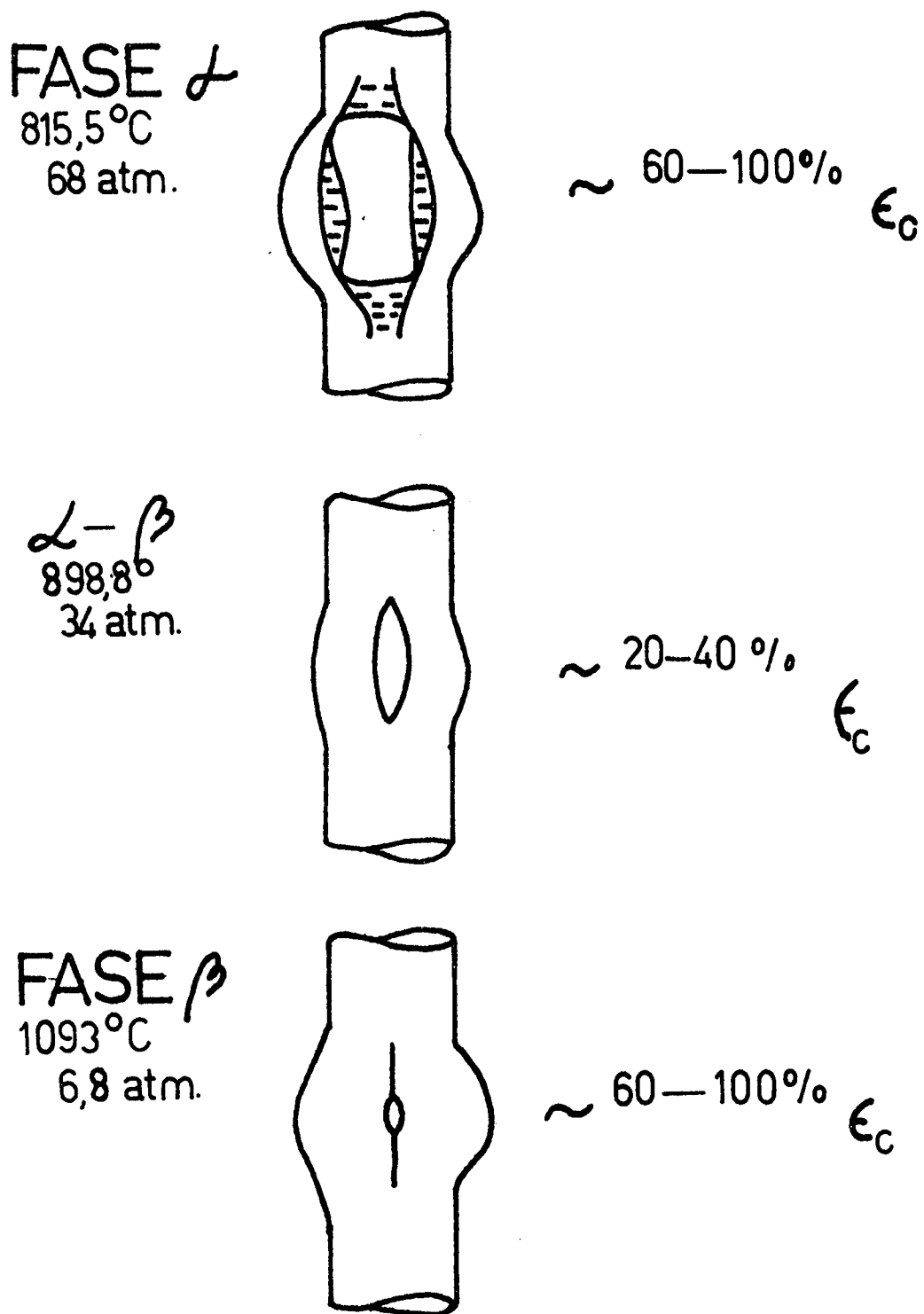


fig.13

para resistir las sollicitaciones provenientes de una condición exigida.

A continuación, se describe brevemente la mecánica a seguir para efectuar tal verificación.

Se asume que una cierta cantidad de elementos combustibles, alrededor de un 30%, no saldrán indemnes del accidente. Dado que con el núcleo en equilibrio, existirán elementos que se encuentran en diferentes etapas de su vida útil, habrá una cierta distribución de presión interna para las barras de los combustibles que componen el núcleo. En primera aproximación esas presiones serán mayores para aquellos elementos con mayor tiempo de residencia.

Adoptado el porcentaje de elementos combustibles que deberán mantener su integridad, se podrá obtener de la distribución de presiones la máxima presión correspondiente a ese número de elementos, (P_i) máx. Con este valor, y conocida la relación P_i vs temperatura de rotura para las características de la situación en estudio, se obtiene la temperatura a la cual rompe la vaina (TR).

Dado que transcurrirá un cierto tiempo Δt_s , antes que entre en funcionamiento efectivo el Sistema de Refrigeración de Emergencia, se deberá verificar que:

$$\Delta t_R = \frac{TR}{\dot{R}} > \Delta t_s$$

donde \dot{R} es la velocidad de calentamiento de la vaina para las condiciones del accidente y Δt_R es el tiempo que transcurre hasta la rotura desde el momento que se inicia el problema con el refrigerante.

Esto asegura que la refrigeración de emergencia impedirá que la vaina alcance la temperatura de ruptura en esas condiciones. Pero, deberá comprobarse no solo que la barra no falle, sino que también podrá seguir operando con un cierto grado de confiabilidad una vez controlado el accidente, y que el grado de deformación que alcance no sea lo suficientemente grande como para agravar la condición de falta de refrigera-

ción al disminuir excesivamente la sección efectiva del canal de refrigeración.

Por lo que el diseñador procederá a verificar el cumplimiento de algunos de los siguientes criterios:

El criterio americano

- (1) La T° máxima no debe exceder 1200°C
- (2) La oxidación total calculada no debe exceder 0.17 veces (17%) el espesor de la vaina inicial.

El criterio "PAWEL"

- (1) La cantidad de β Zr-remanente
- (2) La Conc de O_2 dentro del β - Zr
- (3) La presencia o no de inclusiones de α Zry.

El promedio de concentración de O_2 en la fase β debe ser menor que 0.7% y menor que 95% respecto a saturación.

Criterio alternativo canadiense

La concentración de Oxígeno debe ser menor que 0.7% sobre por lo menos la mitad del espesor de la vaina.

Información Requerida

A los efectos de realizar la verificación del diseño de un combustible para condiciones límites de operación, es necesario contar con información relacionada con las propiedades de los tubos de Zircaloy a altas temperaturas y con el estado térmico del núcleo para ese tipo de situaciones, y que fundamentalmente comprende la determinación de los efectos de la:

- . alta temperatura sobre las vainas de Zircaloy.
- . concentración de oxígeno en la fragilización de las vainas.
- . temperatura en la deformación de los tubos (abalonado)
- . reducción o eliminación de la refrigeración en la generación de calor por decaimiento del material combustible y por la energía almacenada en la barra.