

08.76.11

ARCHIVO PUBLICACIONES

Nº

1976

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
GERENCIA DE ENERGIA

PROYECTO REACTOR DE 10 MW PARA PERU

I.- DISEÑO NUCLEAR DEL REACTOR

R. Corcuera, J. Testoni

II.- DISEÑO DE LOS BLINDAJES BIOLOGICOS

J. Babino, V. Hoffmann

CNEA - Re - 126

DEPARTAMENTO DE REACTORES

PROYECTO REACTOR DE 10 MW PARA PERU

I.- DISEÑO NUCLEAR DEL REACTOR

R. Corcuera, J. Testoni

II.- DISEÑO DE LOS BLINDAJES BIOLÓGICOS

J. Babino, V. Hoffmann

Comisión Nacional de Energía Atómica
DIV. CALCULO Y ANALISIS DE REACTORES

RESUMEN

A fin de formalizar la oferta a PERU por un reactor de irradiación de 10 Mw basado en el Reactor R.A.-3 del C.A. Ezeiza, la División Cálculo y Análisis de Reactores realizó el diseño nuclear del reactor, así como el diseño de todos los blindajes biológicos existentes en la instalación.

Asimismo de ello resultan determinadas las dimensiones del recipiente del reactor y de los tanques de decaimiento. El conjunto de este diseño básico de referencia puede evidentemente sufrir modificaciones u optimizaciones menores surgidas de las condiciones de construcción del reactor.

El nivel de potencia al que se apunta obliga a prever una fase inicial de subida en potencia a medida que se incrementa el quemado del núcleo y el número de elementos combustibles, a fin de no superar en ningún momento un valor de diseño que resulta para la potencia específica máxima.

Se determinaron todos los parámetros más importantes para el núcleo fresco y el de equilibrio, y se obtuvo una estrategia de movimiento y recambio del combustible que garantiza a la vez un factor de forma total adecuado y un quemado de extracción elevado.

Se estudiaron dos configuraciones de blindajes del reactor con distintos tipos de hormigón. Paralelamente se fijaron las dimensiones mínimas de los tanques de decaimiento necesarias para cumplir con los requisitos de seguridad y se determinaron los blindajes de dichos tanques para dos formas posibles de los mismos.

Finalmente se fijaron los blindajes definitivos para la configuración integrada reactor/tanques de decaimiento.

INDICE

	Pág.
Resumen	1
Introducción	4
<u>PARTE I: DISEÑO FISICO DEL NUCLEO DEL REACTOR</u>	
<u>CAP. I: PASAJE A UNA POTENCIA TOTAL DE 10 MW</u>	7
<u>CAP. II: ELEMENTO COMBUSTIBLE</u>	9
II.1.- Principales características físicas del elemento combustible.	9
II.2.- Cálculos de evolución con el quemado	10
II.3.- Composición isotópica del combustible irradiado.	11
II.4.- Constantes de celda y parámetros integrales.	11
II.5.- Espectros neutrónicos.	12
II.6.- Heterogeneidad del flujo.	14
<u>CAP. III: CALCULOS DE REACTOR</u>	
III.1.- Análisis de diversas configuraciones.	15
III.2.- Métodos de cálculo.	16
III.3.- Reactividades	17
III.4.- Flujos	19
III.5.- Potencia específica	22
<u>CAP. IV: CALCULOS DE QUEMADO DEL COMBUSTIBLE</u>	
IV.1.- Definición del caso estudiado.	24
IV.2.- Métodos de cálculo	25
IV.3.- Determinación de quemados iniciales	26
IV.4.- Ciclo de movimiento de combustible para el núcleo en equilibrio	28
IV.5.- Influencia de las Barras de Control en el ciclo de Operación del núcleo.	29
IV.6.- Requerimientos de combustible.	32
<u>PARTE II: DISEÑO BASICO DE LOS BLINDAJES DEL REACTOR Y TANQUES DE DECAI- MIENTO</u>	
<u>CAP. V: BLINDAJE DEL NUCLEO</u>	
V.1.- Datos del núcleo.	34
V.2.- Cálculo del blindaje radial	34

V.3.- Cálculo de la altura de agua	35
V.4.- Dimensiones del recipiente del reactor.	36
<u>CAP.VI:</u> BLINDAJE DEL TANQUE DE DECAIMIENTO - OPCION A (TANQUES CILINDRICOS)	
VI.1.- Calculo de la fuente	37
VI.2.- Cálculo del blindaje radial	39
VI.3.- Conclusiones	43
<u>CAP. VII:</u> BLINDAJE DEL TANQUE DE DECAIMIENTO - OPCION B	
VII.1.- Datos del cálculo	45
VII.2.- Presentación y discusión de los resultados obtenidos "	
VII.3.- Conclusiones	46
REFERENCIAS	48
<u>ANEXO I:</u> PARAMETROS PRINCIPALES DEL REACTOR	
AI.1.- Parámetros generales	50
AI.2.- Reactor	50
AI.3.- Núcleo	51
AI.4.- Reactividades y flujos	51
AI.5.- Refrigeración del núcleo	52
AI.6.- Tanques de decaimiento y blindajes	52
<u>ANEXO II:</u> RESUMEN DE CARACTERISTICAS DEL NUCLEO	
AII.1.- Parámetros termohidráulicos	53
AII.2.- Características físicas del Elemento Combustible	53
AII.3.- Parámetros neutrónicos del núcleo	56
AII.4.- Características del Núcleo en Equilibrio y Movimiento de Combustible.	57
TABLAS	60 - 63
FIGURAS	64 - 87

INTRODUCCION

En el curso del presente año la CNEA ofertó al Instituto Peruano de Energía Nuclear, un Reactor de Investigación y Producción de Radioisótopos de diseño propio sobre la base del Reactor R.A.-3 (~5 Mw) del Centro Atómico Ezeiza. Se fijó en 10 Mw la potencia nominal de operación para el reactor propuesto a Perú.

La división Cálculo y Análisis de Reactores realizó el diseño nuclear del reactor, así como el diseño de todos los blindajes biológicos existentes en la instalación y la provisión adicional de especificaciones para los tanques de decaimiento del circuito de refrigeración, así como para el recipiente del reactor.

Este informe presenta una síntesis de estos trabajos y consta de dos partes, la primera relativa al Diseño Físico del Núcleo y la segunda al Diseño de Blindajes.

En la primera parte se describen sucesivamente:

- La factibilidad e implicancias de incrementar la potencia a 10 Mw en el R.A.-3, lo cual en el aspecto refrigeración del núcleo forma parte del diseño termohidráulico efectuado por la Div. Ingeniería de Reactores.
- Los parámetros físicos del elemento combustible y de la celda y su evolución con el quemado.
- Los parámetros nucleares principales del reactor en distintas condiciones de operación (núcleo fresco y núcleo en equilibrio, posición de barras de control, nivel de potencia, etc.).
- La definición de una estrategia optimizada de movimiento y recambio de combustible, la simulación de la operación del núcleo a plena potencia-núcleo en equilibrio, y la determinación del quemado de extracción del combustible para ese núcleo.

La segunda parte comprende:

- El diseño del blindaje radial del núcleo. Se estudiaron para esto

caso dos configuraciones distintas: en una el blindaje está constituido básicamente por una zona de agua y otra de hormigón común, en la otra se reemplazó una parte de hormigón común por hormigón pesado.

- El cálculo de la altura de agua sobre el núcleo para llevar la exposición a niveles permitidos. Ello determina a su vez las dimensiones del recipiente del reactor.

- El diseño del blindaje de los tanques de decaimiento. Se consideraron dos formas distintas para los tanques. En ambos casos se calculó previamente la fuente de radiación correspondiente a los principales isótopos activables (O^{16} y O^{17}). También en los dos casos se determinaron las dimensiones mínimas de los tanques para cumplir con los requisitos de seguridad.

- La presentación de dos configuraciones (una para cada forma de los tanques) del conjunto reactor-tanques de decaimiento con los blindajes apropiados.

PARTE I

DISEÑO FISICO DEL NUCLEO DEL REACTOR

CAPITULO I

" PASAJE A UNA POTENCIA TOTAL DE 10 MW

El concebir que un reactor como el R.A.-3 debe aumentar su potencia a 10 Mw, podría implicar en principio una modificación tanto en su configuración para operación a la nueva potencia nominal como, eventualmente, en las características de las cajas de elementos combustibles.

Se analizó, no obstante, si no sería posible conservar estrictamente las mismas características de la configuración del núcleo y del elemento combustible, modificando solamente el caudal de refrigerante ajustándolo al nuevo nivel de potencia.

El resultado es que efectivamente ello es posible, con lo cual quedan inmediatamente fijadas una serie de características, sin perjuicio de poder luego introducir modificaciones para optimizar el diseño o bien ajustarlo a ciertas condiciones de fabricación de los componentes del núcleo.

D. Parkansky (ref./1/) analizó las condiciones de refrigeración del núcleo en el caso de tenerse la configuración NB-20, de 28 cajas combustibles con una potencia total generada de 10 Mw. Para ello se supuso un factor de forma total $F_q = 2,5$, valor conservativo ya que, como se verá en IV.4, para el núcleo en equilibrio a plena potencia se obtiene $F_q \cong 2,0$. En esas condiciones se obtiene un flujo calórico máximo en las placas combustibles $\phi_{cal.max.} = 66 \text{ W/cm}^2$, lo que implica una velocidad mínima de circulación del refrigerante $V_{min} = 2,55 \text{ m/seg}$, con un caudal total $Q = 1100 \text{ m}^3/\text{h}$ suponiendo una temperatura de entrada de refrigerante $T_c = 45^\circ\text{C}$. La velocidad de circulación dada es perfectamente obtenible: es evidentemente mayor que el valor nominal en el R.A.-3 ($V_{min} = 1.4 \text{ m/seg}$, $Q = 730 \text{ m}^3/\text{h}$, para $P_{tot} = 6,4 \text{ Mw}$) pero bastante inferior al valor 4 m/seg correspondiente al reactor francés SILOE (ref./2/).

El flujo calórico máximo consignado implica para el elemento com

bustible descrito en la sección II.1 una potencia específica máxima $P_e^{\max} = 315,8 \text{ W/cm}^3$.

En resumen, desde el punto de vista de la refrigeración de los elementos combustibles, no existe en principio ningún impedimento para pasar a 10 Mw.

Concluyendo, consideramos en lo sucesivo, configuraciones del núcleo nominal con aproximadamente 28 cajas de elementos combustibles como la considerada aquí (NB-20). Ello permite asegurar el cumplimiento de las condiciones de potencia total y refrigeración ya que el factor de forma supuesto es, como señalamos anteriormente, superior al que luego resulta realmente ($F_q = 2,0$). Los requisitos de criticidad y su relación con el quemado serán considerados en otras secciones.

CAPITULO II

" ELEMENTO COMBUSTIBLE"

II.1.- PRINCIPALES CARACTERISTICAS FISICAS DEL ELEMENTO COMBUSTIBLE

Se considera que el elemento combustible será idéntico a los actualmente en uso en el reactor R.A.-3. Sus características son por consiguiente las descritas en la ref. /3/, excepto que la cantidad de U^{235} por elemento combustible (caja combustible) es ahora de 200 gr. (± 10 gr).

Las principales características físicas de cada elemento combustible son las siguientes:

- a) Caja combustible con estructura de aluminio de 76,2 mm x 80,3 mm de sección transversal, conteniendo 19 placas combustibles. (Ver detalle en figura 1).
- b) Placa combustible constituida por una lámina combustible revestida con vainas de aluminio.
 - Separación entre centros de placas = 4,18 mm.
 - Espesor de la placa = 1,38 mm.
- c) Lámina combustible constituida por una aleación de aluminio-uranio (enriquecido al 90 % en U^{235})
 - Espesor de la lámina = 0,54 mm
 - Ancho = 5,95 cm
 - Largo = 61,5 cm
 - Densidad = 3,138 gr/cm³

Composición de la lámina

<u>Material</u>	<u>% en peso</u>	<u>gramos por lámina</u>
U^{235}	16,8	10,53
U^{238}	1,9	1,17
Al	81,3	50,80

Los elementos combustibles destinados a permitir la introducción de barras de control son similares a las cajas normales excepto que contienen 15 placas combustibles en lugar de 19. Su representación geométrica en los cálculos de reactor se da en la sección III.2.

Las masas de los distintos componentes del combustible de una caja normal es la siguiente:

U^{235}	_____	200 gr
U	_____	222 gr
Aleación Al U	_____	1187 gr

Esto significa para una configuración tipo NB-20 de 24 EC normales y 4 EC con barras las siguientes masas de componentes.

U^{235}	_____	5,43 Kg
U	_____	6,04 Kg
Aleación Al-U	_____	32,25 Kg

II.2.- CALCULOS DE EVOLUCION CON EL QUEMADO

Para el elemento combustible antes mencionado, se efectuaron los cálculos de parámetros físicos de celda para núcleo a plena potencia con evolución por irradiación del combustible. Dichos cálculos se efectuaron con el código de celdas METHUSELAH, ref./4/. Si designamos con T.C., T.U. y $T.U^5$ a la tonelada de aleación, de uranio ($U^{235} + U^{238}$) y de U^{235} respectivamente, dados los valores mostrados en la sección precedente, se tienen las siguientes relaciones entre los quemados, Q, del combustible expresados en distintas unidades:

$$Q \text{ (MWd/T.U)} = 5,35 * Q \text{ (MWd/T.C.)}$$

$$Q \text{ (MWd/T.U}^5\text{)} = 5,95 * Q \text{ (MWd/T.C.)}$$

Los cálculos de evolución se efectuaron hasta alcanzar un consumo de U^{235} del orden o algo mayor del 30 % basándose en los quemados realmente obtenidos en el R.A.-3 y en el reactor francés SILOE en su versión inicial a 10 MW, ref./5/. Para ese consumo de U^{235} , el quemado del combustible excede los 200.000 MWd/T.U. (~ 38.000 MWd/T.C.)

II.3.- COMPOSICION ISOTOPICA DEL COMBUSTIBLE IRRADIADO

La tabla 1 muestra la concentración porcentual en peso $\epsilon(\%)$ de los componentes de mayor interés: U^{235} , U^{238} , Pu^{239} , Sm^{149} , Xe^{135} . Dichos valores corresponden a un E.C. (elemento combustible) ligeramente distinto del E.C. nominal dado en II.1. En efecto, se tomó aquí el caso más desfavorable de E.C., de acuerdo a los márgenes de tolerancia : 190 gr. en lugar de 200 gr. de U^{235} por caja . No obstante, esta diferencia no introduce ninguna modificación de importancia en los resultados que siguen .

Se observa allí que mientras el consumo porcentual de U^{235} , $\delta(\%)U^{235}(*)$ aumenta en forma prácticamente lineal con el quemado, la concentración de U^{238} muestra una muy lenta disminución con la cual la relación porcentual de Pu^{239} a U^{235} inicial, $\delta'(\%)Pu^{239}(**)$ se mantiene en todo momento muy baja y alejada de $\delta(\%)U^{235}$. Es decir que prácticamente la presencia del U^{238} y la formación de Pu^{239} no tendrán ninguna importancia en el balance de reactividad del combustible en función del quemado.

El tenor de Sm^{149} y Xe^{135} decrece con la irradiación siguiendo la evolución de la concentración de U^{235} .

II.4.- CONSTANTES DE CELDA Y PARAMETROS INTEGRALES

Los cálculos de quemado antes mencionados proveen constantes multigrupo para la celda homogeneizada. La figura 2 muestra las secciones eficaces a 2 grupos de energía , D , Σ_a , Σ_{rem} , Σ_f y $\nu\Sigma_f$ (***) , así como los parámetros k_∞ y k_{ef} correspondientes a un laplaciano geométrico

$$(*) \delta(\%)U^{235} = \frac{\epsilon(U^{235}, BU.) - \epsilon(U^{235}, B.U.=0)}{\epsilon(U^{235}, B.U.=0)} * 100$$

$$(**) \delta'(\%)Pu^{239} = \frac{\epsilon(Pu^{239}, B.U.)}{\epsilon(U^{235}, B.U.=0)} * 100$$

(***) Se ajustó el valor de ν del U^{235} (modificado en $\sim 1\%$) sobre una configuración de núcleo desnudo crítico medido en el reactor R.A.-2.

total $B_g^2 = 71 \text{ m}^{-2}$ próximo al que se espera tener en el reactor (con 25 a 30 cajas combustibles).

A diferencia del caso de reactores a uranio natural, como ATUCHA, donde Σ_f crece con el quemado (debido al efecto del Pu^{239}), en el caso presente Σ_f decrece prácticamente en forma lineal por lo visto antes sobre el rol del U^{238} y el Pu^{239} . Por consiguiente, al operar el reactor a potencia constante, el flujo neutrónico crecerá al aumentar el quemado. No obstante este efecto será de menor importancia para el núcleo en equilibrio donde se efectuarán movimientos y recambios de combustible con períodos muy cortos.

II.5.-ESPECTROS NEUTRONICOS

Los cálculos de celda efectuados por METHUSELAH proveen los espectros neutrónicos a 2 y a 4 grupos de energía. Los límites energéticos son los siguientes:

2 grupos

1 (rápido):	0,625 eV a	10 MeV
2 (térmico):	0 eV a	0,625 eV

4 grupos

1 (rápido):	821 KeV a	10 MeV
2 (intermedio):	5,5 KeV a	821 KeV
3 (epitérmico):	0,625 eV a	5,5 KeV
4 (térmico):	0 eV a	0,625 eV

Espectros a 2 y 4 grupos y relaciones de flujo a 2 grupos ϕ_r/ϕ_t en el refrigerante contiguo a las placas combustibles, en función del quemado del combustible:

a) $Q = 0 \text{ MWd/T.C.} = 0 \text{ MWd/T.U.}$

<u>Grupo</u>	<u>Espectro</u>	<u>Grupo</u>	<u>Espectro</u>
1:	24,4 %	1:	75,8 %
2:	28,3 %		
3:	23,1 %		
4:	24,2 %	2:	24,2 %

$$\phi_1/\phi_2 = 3.13$$

b) $Q = 10552 \text{ MWd/T.C.} = 56453 \text{ MWd/T.U.}$

<u>Grupo</u>	<u>Espectro</u>	<u>Grupo</u>	<u>Espectro</u>
1:	23,9	1:	74,3
2:	27,6		
3:	22,8		
4:	25,7	2:	25,7

$$\phi_1/\phi_2 = 2,89$$

c) $Q = 23215 \text{ MWd/T.C.} = 124200 \text{ MWd/T.U.}$

<u>Grupo</u>	<u>Espectro</u>	<u>Grupo</u>	<u>Espectro</u>
1:	23,1	1:	72,3
2:	26,8		
3:	22,4		
4:	27,7	2:	27,7

$$\phi_1/\phi_2 = 2,61$$

d) $Q = 33768 \text{ MWd/T.C.} = 180659 \text{ MWd/T.U.}$

<u>Grupo</u>	<u>Espectro</u>	<u>Grupo</u>	<u>Espectro</u>
1:	22,4	1:	70,3
2:	25,9		
3:	22,0		
4:	29,7	2:	29,7

$$\phi_1/\phi_2 = 2.37$$

II.6.- HETEROGENEIDAD DEL FLUJO

El pequeño espesor y la reducida distancia entre placas combustibles produce una muy débil heterogeneidad en el flujo. Las relaciones entre flujo en la lámina combustible y flujo en el refrigerante, a dos grupos de energía son para todo quemado entre 0 y 35.000 MWd/T.C.:

$$\frac{\phi_{\text{comb}}}{\phi_{\text{refrig.}}}_r = 1,0 \qquad \frac{\phi_{\text{comb.}}}{\phi_{\text{refrig.}}}_t = 0,95$$

CAPITULO III

"CALCULOS DE REACTOR"

III.1.-ANALISIS DE DIVERSAS CONFIGURACIONES

Una vez hechos los cálculos de celda correspondientes a los combustibles descriptos en la sección II.1 se procedió a efectuar cálculos de reactor para tres configuraciones sugeridas por la experiencia resultante de la operación del reactor .R.A.-3 y las consideraciones del capítulo I.

En primer lugar se estudió la configuración llamada NB-20 que se muestra en la figura 3. Esta configuración consta de 24 elementos combustibles, 4 elementos combustibles con barras de control y seguridad (ver sección II.1) y 14 bloques reflectores de grafito. Uno de ellos contiene una barra de pilotaje.

Esta barra no se tuvo en cuenta en los cálculos con el objeto de obtener simetría dos y simplificar así los procedimientos. Para esta configuración se calcularon flujos a dos grupos de energía y reactividades para el núcleo fresco en 4 situaciones: casos con y sin potencia (v.g. Xe y Sm en equilibrio), y cada uno de estos casos a su vez con barras totalmente insertadas, y con barras totalmente extraídas. En segundo lugar se estudió la configuración que se encuentra actualmente en operación en el R.A.-3 : (Ver figura 4), Conf. 1 , pero representada en forma simplificada con simetría cuatro, como se muestra en la figura 5.A . Esta configuración, que se denominará Conf. 2, consta de 25 elementos combustibles, 4 elementos combustibles con barras de control y seguridad y 20 bloques reflectores de grafito (la configuración Conf. 1 posee, en cambio, 22 bloques de grafito y un E.C. adicional con barra en la periferia del núcleo).

Para este caso se realizaron cálculos para el núcleo fresco con potencia, con barras totalmente insertadas y con barras totalmente extraídas.

En tercer lugar se estudió la configuración Conf. 3 que se muestra en la figura 5B, la que , a su vez es una simplificación de la configuración Conf.2 destinada a posteriores cálculos de quemado y movimiento de combusti-

ble (ver capítulo IV).

Esta configuración posee también simetría cuatro y consta de 24 elementos combustibles, 4 elementos combustibles con barras de control y seguridad y 20 bloques reflectores de grafito.

Para esta configuración se efectuaron cálculos simulando el núcleo de equilibrio, con quemados Q^{cj} (donde cj se refiere al canal j , ver figura 13) próximos a los quemados iniciales de los ciclos de movimiento de combustible que se describen en la sección IV.4 ($Q^{c1} = 11438$, $Q^{c2} = 0$, $Q^{c3} = 7160$, $Q^{c4} = 17480$, $Q^{c5} = 32169$, $Q^{c6} = 24398$, $Q^{c7} = 5442$, en MWd/T.C.). Se calcularon los casos con barras totalmente insertadas y con barras totalmente extraídas.

Los cálculos citados permiten obtener valores de flujos y reactividades para diversos casos, simultáneamente sencillos y realistas que sirven de base para determinar parámetros de diseño.

III.2.- METODOS DE CALCULO

Los cálculos de reactor se efectuaron mediante el código de difusión a dos grupos de energía EQUIPOISE-III ref./6/ Los cálculos, se realizaron en geometría XY, utilizando básicamente las constantes de celda calculadas con el código METHUSELAH-II (Ver sección II.4) ajustadas de distintas formas según la configuración considerada.

En la tabla 2 se dan las constantes utilizadas en los casos NB-20 y Conf. 2, conjuntamente con las constantes del grafito, del agua liviana y el cadmio

Las constantes correspondientes al caso Conf. 3 son estrictamente las mencionadas en la sección II.4 y graficadas en la figura 2. Las barras de control y seguridad se describieron como se indica en la figura 6, tratando de distribuir los diversos materiales según proporciones y ubicaciones que reproducen de manera aceptable la heterogeneidad real.

Para cada caso se obtienen flujos a dos grupos de energía y la reactividad correspondiente.

En los cálculos se utilizó como valor del laplaciano axial, $B_2^2 = 21,13 \text{ m}^{-2}$. Este valor incluye la ganancia por reflector y fue obtenido de mediciones realizadas en el reactor R.A.-2 (ref. /8/).

III.3.- REACTIVIDADES

De los cálculos correspondientes a la configuración NB-20 resultan los siguientes valores de reactividad

<u>BARRAS</u>	<u>POTENCIA</u>	<u>ρ (p cm)</u>
sin	sin	13.600
con	sin	-2.500
sin	con	9.400
con	con	-7.000

Esto significa que:

- El núcleo fresco para la configuración NB-20 sin potencia tendría 13.600 pcm de exceso de reactividad.
- El núcleo fresco perdería entre 4.200 y 4.500 pcm de reactividad al operar a plena potencia (antirreactividad de Xe, Sm, etc.).
- El conjunto de las cuatro barras en el caso de núcleo fresco sin potencia posee un antirreactividad de 16.100 pcm.
- La potencia aumenta el valor de las barras en 300 pcm y a su vez la presencia de las barras completamente insertadas aumenta el valor de los venenos en equilibrio (Xe, Sm, etc) en 300 pcm.

Los cálculos correspondientes a la configuración Conf.2 arrojan los siguientes valores de reactividad para el núcleo fresco con potencia.

<u>BARRAS</u>	<u>POTENCIA</u>	<u>ρ (p cm)</u>
sin	con	11.200
con	con	-5.000

valores que implican una antireactividad para las barras completamente insertadas de 16.200 pcm. Esto indica que este valor es aproximadamente independiente de la configuración.

Por otro lado, un elemento combustible y seis bloques reflectores más (sumados al cambio de geometría que muestran las figuras 3 y 5A) conduciría a un aumento de reactividad de 1.800 pcm.

Los cálculos correspondientes a la configuración Conf.3 a plena potencia con la distribución de quemados mencionados en la sección III.1 ($\bar{Q} = 14.000 \text{ MWd/T.C.}$) conducen a los siguientes valores en reactividad.

<u>BARRAS</u>	<u>POTENCIA</u>	<u>ρ(pcm)</u>
sin	con	5.600
con	con	-9.400

De donde se deduce un valor para las barras de 15.000 pcm, coherente con los anteriores.

De la experiencia ganada con el reactor R.A.-3 pueden determinarse como valores razonables para la antirreactividad asociada a instrumentación y estructuras unos 1.800 pcm a 2.000 pcm y como reserva de reactividad necesaria para superar luego de una parada del reactor el efecto del Xe^{135} , aproximadamente 1.700 pcm. La variación de reactividad por temperatura puede despreciarse al establecer un balance provisorio de reactividad.

De los valores de reactividades obtenidos pueden sacarse las siguientes conclusiones:

- a) La reactividad del núcleo fresco con 28 a 30 cajas, si bien podría controlarse con las barras, no cumple con el requisito de seguridad de controlar con cada par de barras un 125 % del exceso, aún considerando la antirreactividad debida a instrumentación y estructuras.

Para los valores de reactividad de barras obtenidos y los de instrumentación y de estructuras mencionados, debería tenerse un núcleo fresco de 8.200 pcm de exceso de reactividad para cumplir con los requisitos de seguridad.

Esto significa que deberá proyectarse una estrategia de aproximación al equilibrio de quemado que parta de una configuración menos reactiva que la NB-20.

Es decir que el núcleo fresco de arranque deberá poseer un número bastante menor de cajas combustibles de modo de poseer un exceso de reactividad controlable por las barras. A su vez eso implicaría una menor potencia total, dada la limitación en la potencia específica. Así se comenzará la operación con un bajo nivel de potencia y a medida que progresa la irradiación de ese núcleo inicial, se podrán agregar nuevas cajas combustibles en la periferia con lo cual se aumentará la potencia total. Estos agregados se harán respetando las limitaciones sobre la reactividad de exceso del núcleo y la potencia.

- b) La configuración Conf.3 con el quemado indicado anteriormente, aún sin considerar la antirreactividad por instrumentación y estructura, cumpliría con los requisitos de seguridad, si bien un poco estrechamente, ya que la antireactividad de barras requerida es de 14000 pcm y el valor de barras calculado de 15000 pcm. Si se consideran instrumentación y estructuras las barras requeridas deben valer, 9500 pcm.
- c) El exceso de reactividad mínimo del núcleo (antes de un recambio) queda determinado por los 1700 pcm necesarios para superar los efectos del Xe en los arranques.

En el caso estudiado de la configuración Conf.3 libre de instrumentación y estructuras, el valor mínimo de reactividad sería de 3500 pcm, dado por la suma del exceso de reactividad necesario para los arranques más la antirreactividad proveniente de instrumentación y estructuras.

III.4.- FLUJOS

En esta sección se analizan las características de los flujos a dos grupos de energía en el caso de la configuración Conf.3 (figura 5 B) .

En la figura 7 se muestran las distribuciones de flujos promediados sobre la dirección axial del reactor, $\bar{\phi}$, y tomados sobre el eje "a" indicado en la figura 5 B. Se dan los perfiles de flujos rápido, $\bar{\phi}_1$, y térmi-

co, $\bar{\phi}_2$, para los casos con barras totalmente extraídas y con barras totalmente insertadas aún cuando este último caso no corresponda a la operación normal a plena potencia.

Los flujos máximos $\phi_{\max}$ pueden estimarse a partir de los flujos medios $\bar{\phi}$ multiplicando estos por el factor $\pi/2$. Esto implica suponer una distribución axial cosenoidal.

Análoga información, pero referida a los ejes "b" y "c" indicados en la figura 5 B se dan en las figuras 8 y 9 respectivamente. En dichas figuras se señalan las regiones del reactor que corresponden a diversos tramos del eje de abscisas.

Nos referiremos a cada caso caracterizándolo por el nombre del eje correspondiente.

En las figuras 10 y 11 se consignan los valores de los flujos medios, $\bar{\phi}$, en el centro de cada caja para los casos con barras totalmente insertadas y totalmente extraídas respectivamente. Entendemos por "cajas" las verdaderas cajas de combustible, los bloques de grafito y las regiones de reflector líquido (agua liviana) determinadas por un cuadrículado que es extensión del definido por el núcleo del reactor. El número dado en primer lugar corresponde al flujo rápido, $\bar{\phi}_1$, en unidades de 10^{14} neutrones/cm²seg y el dado en segundo lugar al flujo térmico, $\bar{\phi}_2$, expresado en las mismas unidades.

Los flujos máximos se tienen en las cajas C5 c/b (*) y sus valores promediados axialmente son:

$\bar{\phi}_1 = 2.32$ y $\bar{\phi}_2 = 0.931$. Estos valores descienden a $\bar{\phi}_1 = 2.07$ y $\bar{\phi}_2 = 0.869$ cuando se extraen las barras.

A partir de estos últimos valores, que corresponden a una situación más próxima a la operación normal, resultan los siguientes valores para el flujo máximo en todo el reactor operando a 10 MW, con núcleo en equilibrio:

(*) s/b: caso sin barras. c/b: caso con barras.

$$\begin{aligned}\phi_{\text{tot}}^{\text{max}} &= 4.6 * 10^{14} \text{ n/cm}^2 \text{ seg} \\ \phi_{\text{ráp}}^{\text{max}} &= 3.2 * 10^{14} \text{ n/cm}^2 \text{ seg} \\ \phi_{\text{tér}}^{\text{max}} &= 1.4 * 10^{14} \text{ n/cm}^2 \text{ seg}\end{aligned}$$

Los flujos mínimos se tienen en las cajas C2 s/b y son $\bar{\phi}_1 = 1.180$ y $\bar{\phi}_2 = 0.452$. Estos valores ascienden a $\bar{\phi}_1 = 1.354$ y $\bar{\phi}_2 = 0.505$ cuando se insertan las barras.

Las figuras 7, 8 y 9 muestran los efectos de las barras en diversas zonas del reactor que se manifiestan como depresiones e incrementos de los flujos y como endurecimientos y ablandamientos de los espectros. El efecto de los reflectores puede apreciarse sin dificultad. La inserción de las barras aumenta los flujos, por lo tanto aumentará los quemados, en todas las cajas, con la excepción a parte de la propia caja C3 (caja con barra) del flujo térmico, ϕ_2 , de C1. El flujo en dicha caja es afectado por la fuerte depresión producida en el entorno de la barra (caja C3) que puede observarse en la figura 9.

Los flujos correspondientes a las regiones externas al núcleo contiguas al reflector de grafito, es decir de las regiones aptas para la ubicación de cajas de irradiación, oscilan entre los valores mínimos: $\bar{\phi}_1 = 0.0578$ y $\bar{\phi}_2 = 0.156$ y los valores máximos $\bar{\phi}_1 = 0.383$ y $\bar{\phi}_2 = 0.739$. Estos últimos corresponden a la región contigua a las cajas C4 y C7 y se obtienen con barras insertadas. De los perfiles de flujo puede tenerse una indicación de la inhomogeneidad del mismo, dentro de una caja de irradiación ($\sim 500\%$).

En los casos "a" y "b" s/b se observan perturbaciones sobre las cajas C3 y C5 que se deben a la ausencia de combustible en los canales por donde se deslizan las barras absorbentes.

En la figura 12 se dan los espectros en cada región, $\bar{\phi}_1/\bar{\phi}_2$, para los casos con barras totalmente extraídas y totalmente insertadas.

En el núcleo del reactor el flujo rápido supera al térmico en un factor próximo a 3, debido al alto enriquecimiento del combustible.

El reflector de grafito modifica drásticamente el espectro y es

así que en la zona externa al reflector predominan los neutrones térmicos sobre los rápidos en un factor entre 2 y 3.

Los espectros del caso con barras sólo difieren sustancialmente de los del caso sin barras en la caja que contiene la barra.

Toda la información discutida ha sido dada para los casos extremos con barras totalmente insertadas y con barras totalmente extraídas, la situación real será intermedia y por lo tanto la mencionada información nos dará idea de límites y órdenes de magnitud de los parámetros de interés.

III.5.- POTENCIA ESPECIFICA

Según se señaló en el capítulo I la potencia específica máxima que permite una correcta refrigeración en la configuración NB-20 es $P_{\max} = 315.8 \text{ W/cm}^3$. Verifiquemos si los flujos que resultan en la sección III.4 y que corresponden a la configuración Conf.3, cumplen con esta condición:

Tomemos los flujos máximos (promediados axialmente), esto es en las cajas C5 c/b (Ver sección III.4)

$$\bar{\phi}_1 = 2.32 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \text{ seg} \quad \text{y} \quad \bar{\phi}_2 = 0.931 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \text{ seg}$$

Si consideramos una distribución axial cosenoidal tendremos los correspondientes flujos máximos

$$\phi_1^{\max} = 3.64 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \text{ seg} \quad \text{y} \quad \phi_2^{\max} = 1.46 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \text{ seg}$$

Si tomásemos las secciones eficaces de fisión para el caso más desfavorable, correspondiente a núcleo fresco, (el quemado en C5 para el equilibrio es superior a los 28000 MWd/T.C.): Tendremos así sobre el centro de las cajas C5, 7.58×10^{12} fisiones/cm³ seg que corresponde a una potencia específica $P_e = 245 \text{ W/cm}^3$, (1 MW = 3.1×10^{16} fisiones), es decir un valor menor que el máximo tolerado señalado más arriba.

Teniendo en cuenta que la altura de la zona físil de una caja combustible es 61,5 cm y su sección es 7,62 cm x 8,03 cm, resulta que el volumen nominal activo de una caja incluyendo vainas y refrigerante adyacentes a las láminas combustibles es de 3,763 litros.

Para una configuración normal de 28 E.C., el volumen del núcleo propiamente dicho es $V_N = 105,37$ litros.

Por consiguiente la potencia específica media es en estas condiciones $P_e = 94,91$ W/cm³.

CAPITULO IV

"CALCULOS DE QUEMADO DEL COMBUSTIBLE"

IV.1.- DEFINICION DEL CASO ESTUDIADO

Con el objeto de estudiar el comportamiento del reactor desde el punto de vista del quemado de los combustibles se eligió una configuración del reactor, Conf.3, próxima a la configuración actual del reactor R.A.-3 (Conf.1), con una geometría aún más simplificada que la Conf.2 (Ver figuras 4, 5A y 5B). De esta manera se pretende lograr una mayor sencillez de los métodos de cálculo conservando, al mismo tiempo, cierto realismo.

La configuración Conf.3 consta de 24 cajas de E.C., 4 E.C. con barras de control y seguridad y 20 bloques reflectores de grafito. Además, goza de simetría cuatro y las barras de control están ubicadas de una manera que facilita el cálculo de flujos sin modificar sustancialmente las características de las barras del caso de partida.

El caso estudiado corresponde a una simulación de la operación del núcleo en estado de equilibrio y se determinó procediendo de la siguiente manera:

- 1) Se realizaron cálculos preliminares de flujos y reactividades para varios casos de prueba que diferían en el valor del quemado medio $\bar{Q}$ del núcleo;
- 2) Con el objeto de lograr una mayor uniformidad y aplanamiento del flujo se eligió una estrategia de recambio en cadena de manera de hacer circular los combustibles desde la periferia al centro del núcleo siguiendo un camino de potencia creciente. (Ver figura 14). La barra de control se recambia independientemente;
- 3) Se determinó en base a las consideraciones dadas en III.3, un exceso de reactividad mínima (reactividad de reserva antes de un recambio) de $(KEF-1) = 4.000 \text{ pcm}$ ($\rho = 3.846 \text{ pcm}$) a lograr en la situación de barras totalmente extraídas;
- 4) Se impuso la condición de equilibrio, consistente en que el quemado final de los combustibles que ocupan un canal durante un ciclo coin-

cidas con el quemado inicial del canal que deben pasar a ocupar en el próximo ciclo;

- 5) Se utilizaron los datos obtenidos en los casos de prueba (reactividad en función del quemado medio y distribuciones de flujo) para hacer una primera estimación de la distribución de quemado al iniciar un ciclo de irradiación. Con esta última se efectuó un cálculo que permitió obtener una segunda aproximación a dicha distribución, mejorando así los valores de los quemados iniciales del ciclo típico del estado de equilibrio.

IV.2.- METODOS DE CALCULO

El cálculo de quemado se realizó con el programa ZADOC, ref./7/ a dos grupos de energías, en geometría XY .

Las constantes de celda para cada quemado, fueron calculadas por el programa de celda METHUSELAH-II como se describió en II.4 y graficadas en la figura 2. Las constantes del grafito y agua liviana son las dadas en la tabla 2.

En las cajas destinadas a contener las barras de control y seguridad se reemplazan cuatro placas combustibles por dos barras de cadmio. En los cálculos presentes se consideran las barras completamente extraídas. Por consiguiente, las constantes utilizadas se obtuvieron por promedio pesado de las constantes del combustible y las del agua liviana que ocupa el espacio destinado a alojar las barras.

El programa ZADOC efectúa una serie de cálculos de distribuciones de flujos y potencias seguidos por un cálculo de irradiación de cada E.C., en nuestro caso, con un paso de quemado de dos días. Repite esta operación hasta que la reactividad cae a un nivel prefijado, en ese momento realiza el recambio estipulado y, luego, prosigue el cálculo.

Para cada instante de la evolución se tienen valores del quemado, la potencia y el ritmo de quemado en cada canal y la reactividad y el factor

de forma correspondientes

Los cálculos se efectuaron para varios ciclos de irradiación y recambio. Se observó que al iniciar cada ciclo no se obtiene exactamente la misma distribución de quemado inicial debido a la presencia de los E.C. destinados a alojar barras de control. En efecto, estos E.C. no participan en cada ciclo de las operaciones de recambio encadenadas, sino que su quemado se incrementa constantemente de un ciclo a otro y sólo son recambiados al alcanzar un quemado muy elevado.

Con posterioridad al cálculo con ZADOC, se efectuaron ajustes que corrigen los efectos del hecho de utilizar un paso de tiempo discreto. Se ajustan así los quemados y reactividades al instante preciso en que se llega a la reactividad límite.

IV.3- DETERMINACION DE QUEMADOS INICIALES

Para determinar la distribución de quemados iniciales en un ciclo limitado por dos recambios, de manera tal que al efectuar cada recambio se tenga siempre la misma situación procederemos de la siguiente manera:

- a) Definimos una estrategia de movimiento de combustible en base a los criterios establecidos en IV.1 y a las distribuciones de flujo dadas en III.4.

Se determinó que el combustible fresco entrara por el canal de menor potencia, C2, y que el combustible irradiado se extrajera por el canal de mayor potencia, C5.

Entre ambas operaciones, el E.C. debe efectuar seis movimientos ocupando canales de potencias crecientes.

Llamando n el N° de orden de cada movimiento y j al N° de canal (Ver figura 14) se tiene la siguiente tabla de correspondencias entre n y j , que define la secuencia de movimientos de combustible.

j	n
1	3
2	1
3	B
4	4
5	6
6	5
7	2

B = Barra

- b) De ensayos previos estimamos ritmos de quemado promedio en el ciclo para cada canal j, o lo que es igual para cada paso n, R_j^n , y un valor de quemado medio, $\bar{Q}^f$, en el reactor asociado a la reactividad de corte ρ^f requerida. En nuestro caso, expresando R_j^n en MW/T.C. Se tiene:

$$R_1^3 = 278 \quad R_2^1 = 260 \quad R_3^B = 389 \quad R_4^4 = 302 \quad R_5^6 = 369$$

$$R_6^5 = 328 \quad R_7^2 = 277, \text{ y } \bar{Q}^f = 18.700 \text{ MWd/T.C.}$$

$$\rho^f = 3.846 \text{ pcm (K-1 = 4000 pcm)}.$$

- c) Determinamos un valor razonable de quemado final para los combustibles de la caja que contiene a las barras, Q_3^{Bf} . Por ejemplo, un quemado intermedio respecto de los puestos en juego en el ciclo, en nuestro caso, $Q_3^{Bf} = 15.000 \text{ MWd/T.C.}$
- d) Dadas estas condiciones podemos determinar los quemados iniciales (i) para cada canal j, o paso n, Q_j^{ni} , tales que luego de un período T, que resulta determinado univocamente, conducen a quemados finales (f) en cada canal, tales que corresponden exactamente a los necesarios para iniciar el próximo ciclo. Es decir $Q_j^{n,f} = Q_j^{n+1,i}$. Existirá, desde luego, un canal de entrada (C2), que puede ser alimentado con combustible fresco y un canal de extracción (C5).

El período T queda determinado por la siguiente expresión

$$T = \frac{N \cdot \bar{Q}^f - Q_3^{B,f}}{\sum_{k=1}^N \sum_{n=1}^k R_j^n}.$$

Una vez conocido T, con el quemado de entrada $Q_2^{1,i}$ y los ritmos de quemado R_j^n , pueden determinarse los quemados iniciales $Q_j^{n,i}$ mediante la siguiente fórmula de recurrencia

$$Q_j^{n+1,i} = Q_j^{n,f} = Q_j^{n,i} + R_j \cdot T$$

En nuestro caso $T = 19,35$ días, y expresando $Q_j^{n,i}$ en MWd/T.C. se tiene:

$$\begin{aligned} Q_2^{1i} &= 0 & Q_7^{2i} &= 5.030 & Q_1^{3i} &= 10.390 \\ Q_4^{4i} &= 15.770 & Q_8^{5i} &= 27.960 & Q_5^{6i} &= 21.610 \\ Q_3^{Bi} &= 7.470, & Q_i^{7i} &= 12.600 & \text{y } g^i &= 5.570 \text{ pcm } (K-1 = 5.900 \text{ pcm}) \end{aligned}$$

IV.4.- CICLO DE MOVIMIENTO DE COMBUSTIBLE PARA EL NUCLEO EN EQUILIBRIO

En la figura 13 se muestra un esquema que indica la denominación dada a cada uno de los siete canales existentes y su ubicación. Los cuatro canales C3 contienen las barras de control y seguridad.

La ubicación de los bloques de reflector puede verse en la figura 5-B.

En la figura 13 se da la distribución de potencias por canal en MW en el momento inicial del primer ciclo estudiado, para el caso de potencia total del reactor de 10 MW. A los canales de mayor potencia, C5, le corresponden 0,437 MW por canal y a los de menor potencia, C2, le corresponden 0,305 MW por canal. Los flujos correspondientes fueron dados en la sección III.4 al considerar la configuración Conf.3.

El factor de forma por canal del caso mencionado es 1,224 y el puntual bidimensional 1,275. Si suponemos una distribución de flujo axial cosenooidal tendremos que el factor de forma total, F_q es $\pi/2$ veces mayor que el puntual bidimensional, es decir $F_q = 2,003$.

En la figura 13 se dan también valores del ritmo de quemado que es equivalente a la potencia generada por unidad de masa en MW/T.C., cuyo valor máximo es de 371 MW/T.C. en el canal C5 y el mínimo de 305 MW/T.C. en el canal C2.

El ritmo medio de quemado en todo el núcleo es de 315 MW/T.C., que es otra vez equivalente a la potencia específica por unidad de masa promedio en el núcleo.

Las potencias y ritmos de quemado por canal a lo largo de un ciclo pueden llegar a asumir valores que discrepan en menos del 1,5 %.

El factor de forma, prácticamente constante, disminuye al terminar el ciclo en un 1,5 % respecto del valor inicial.

En la figura 14 además de indicarse la estrategia de recambio adoptada se dan los quemados iniciales y finales para cada canal en un ciclo de período $T = 19,35$ días para el caso del núcleo en equilibrio. (Los quemados iniciales y el período son los que se determinaron en la sección IV.3).

En este lapso de tiempo el exceso de reactividad, que inicialmente es de 5.570 pcm, ($KEF-1 = 5.900$ pcm), pasa al límite impuesto de 3.850 pcm ($KEF-1 = 4.000$ pcm). Simultáneamente los quemados en cada canal al final de cada ciclo llegan al valor del quemado inicial del canal al que deben ser transferidos. En el canal de extracción, C5, se llega a un quemado de extracción de 35.100 MWd/T.C. El combustible de la caja que aloja la barra de control y seguridad, de un quemado inicial fijado arbitrariamente en 7.470 MWd/T.C. alcanza los 15.000 MWd/T.C. al terminar este primer ciclo. El quemado medio del núcleo pasa de 12.600 MWd/T.C. a 18.700 MWd/T.C. durante el mismo ciclo.

La reactividad del reactor disminuye a razón de $\frac{d\rho}{dt} = -88,9$ pcm/d.p.p. y la variación de la reactividad con el quemado medio, que es prácticamente lineal, ocurre a un ritmo de $d\rho/dQ = -0,282$ pcm/MWd/T.C. o bien $d\rho/dQ = -1,509$ pcm/MWd/T.U.

La evolución de los quemados por canal, del quemado medio del núcleo y de KEF-1 en el ciclo se muestran en la figura 15. Los quemados se dan en MWd por tonelada métrica de combustible, T.C. y en MWd por tonelada métrica de uranio, T.U.

IV.5.- INFLUENCIA DE LAS BARRAS DE CONTROL EN EL CICLO DE OPERACION DEL NUCLEO.

El ciclo descrito en la sección anterior correspondería estrictamente a un núcleo en equilibrio si se recambiaran también los elementos combustibles que alojan barras de control al fin de cada ciclo.

Veremos a continuación los efectos que produce la permanencia de esos E.C. con barras en varios ciclos con el consiguiente quemado progresivo de sus placas combustibles.

En la figura 16 se muestra la evolución de diversos parámetros durante cuatro ciclos consecutivos en los que al terminar cada uno de ellos se efectuaron los recambios indicados para cada caja, salvo para los E.C. con barras.

El quemado medio final y la reactividad final de cada ciclo permanecen invariables. Esta última por ser una condición impuesta (reactividad de reserva) y la primera porque en el caso que nos ocupa, según se puede constatar, existe una dependencia aproximadamente lineal entre el quemado medio, $\bar{Q}$, y la reactividad, ρ , que es independiente, en primera aproximación, de las distribuciones de quemado, como se muestra en la figura 17.

El quemado medio inicial $\bar{Q}^1$, de un nuevo ciclo es cada vez mayor. En efecto, si tomamos, por ejemplo, el comienzo del segundo ciclo tendremos que $\bar{Q}^1$, estará determinado por los quemados de cada caja combustible, que son idénticos a los del comienzo del primer ciclo, más el quemado del E.C. con barra (no recambiado) que es obviamente mayor a causa de la irradiación sufrida durante ese primer ciclo.

En los sucesivos ciclos se da el mismo proceso y como consecuencia de este hecho la reactividad inicial es cada vez menor. En tal caso, si la potencia, y por lo tanto el ritmo del quemado medio, no varía, se llegará al fin del próximo ciclo con períodos cada vez más cortos y por consiguiente con un quemado de los combustibles deficiente. Es decir que el quemado final de cada canal es cada vez menor en los sucesivos ciclos, en lugar de ser constante como lo implicaría la condición de núcleo en equilibrio. Esta deficiencia es parcialmente compensada en los combustibles por el hecho de que su ritmo de quemado aumenta, debido al progresivo empobrecimiento de los E.C. que contienen barras. ($\sim 5\%$ de aumento en el ritmo de quemado entre un ciclo y el próximo).

Los períodos de los sucesivos ciclos considerados en esta simulación

son: $T = 19,35 ; 15,97 ; 15,42$ y $14,27$ días.

El acortamiento de los ciclos tiene una consecuencia práctica de importancia: La disminución progresiva de los quemados de extracción hasta el momento de efectuar el recambio del E.C. con barras.

Los quemados de extracción disminuyen de 35.100 MWd/T.C. en el primer ciclo a 31.350 MWd/T.C. en el cuarto.

Podríamos establecer tentativamente para la vida útil de un E.C. con barras un período de 65 días. En este tiempo el quemado de los combustibles de la barra igualan al de extracción y este quemado de extracción se deteriora en ~~un~~ $\sim 12\%$ a lo largo de esos cuatro ciclos (65 días).

Entre el primer ciclo y el cuarto el factor de forma se incrementa en un 2% .

En definitiva, de este estudio preliminar relativo a una estrategia de movimiento de combustibles resultaría un ciclo mayor de aproximadamente 65 días a plena potencia al final del cual se recambian todas las cajas de combustibles de la manera indicada en la figura 14. Dentro de ese ciclo mayor se dan cuatro ciclos de período comprendido entre 19.5 y 14.0 d.p.p. Al final de cada uno de los primeros tres de estos cuatro ciclos se recambian todas las cajas salvo las que alojan las barras de control y seguridad.

Estas conclusiones llevarían a un ajuste de los quemados iniciales para lograr un macrociclo que incluya el recambio de E.C. con barras, y que se repita con toda exactitud respondiendo a una condición de equilibrio impuesta sobre las condiciones iniciales y finales del ciclo mayor. Dicha simulación, que incluiría varios macro-ciclos y un ajuste en las operaciones de recambio podrá hacerse en un estudio posterior.

IV.6.-REQUERIMIENTO DE COMBUSTIBLE

De las consideraciones de la sección IV.5. se deduce que adoptando la estrategia estudiada, que por supuesto es susceptible de mejoras, se requiere disponer de cuatro E.C. frescos cada 16 d.p.p. y de cuatro E.C. con barras cada 65 d.p.p. Esto implica 91 E.C. comunes y 23 E.C. con barras por año a plena potencia. La provisión de Uranio enriquecido al 90 % por año a plena potencia será de aproximadamente 25 Kg.

PARTE II

DISEÑO BASICO DE LOS BLINDAJES DEL REACTOR Y TANQUE DE
DECAIMIENTO

CAPITULO V

" BLINDAJE DEL NUCLEO "

V.1.- DATOS DEL NUCLEO

La distribución espacial del flujo térmico fue obtenida a partir de los datos experimentales consignados en ref. /9/.

El espectro energético y la sección eficaz macroscópica Σ de fisión se obtuvieron de un cálculo efectuado con el código TIMOC ref /10/

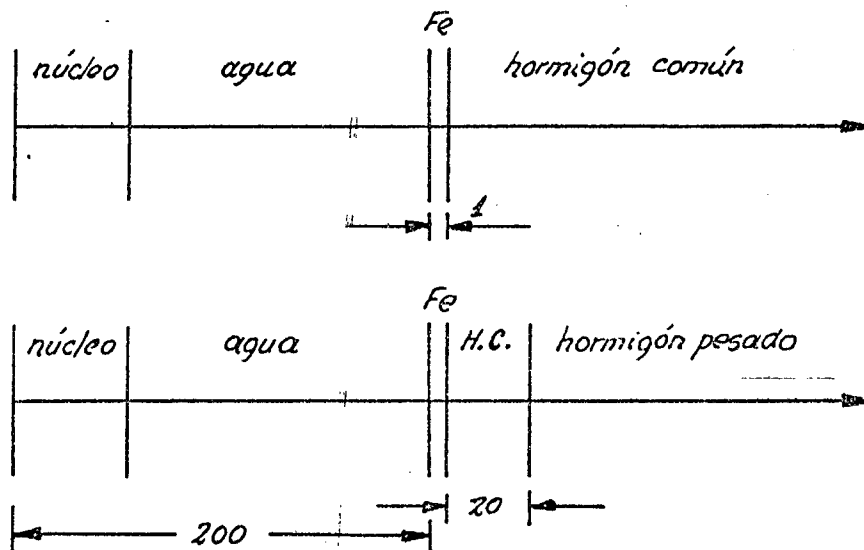
Por otra parte el flujo fue normalizado para obtener una potencia total de 10 Mw.

V.2.- CALCULO DEL BLINDAJE RADIAL

Se realizaron dos cálculos con el código SABINE-3 ref. /11/ de "remoción-difusión" para obtener el espesor de blindaje necesario para disminuir la exposición al nivel permitido, uno con hormigón común (H.C.), $\rho = 2.2 \text{ g/cm}^3$, y otro con hormigón pesado (ilmenita tipo I-NRU ref. /12/) (H.P.), $\rho = 3.49 \text{ g/cm}^3$, el diámetro del tanque del reactor se fijó en 200 cm, con una pared de 1 cm de espesor (en esto se incluye la doble pared) ref. /13/

Se utilizaron los datos nucleares de la biblioteca del SABINE-3.

En ambos casos se realizó el cálculo en geometría cilíndrica con las configuraciones que se muestran en las siguientes figuras:



Las distribuciones de exposición obtenidas se muestran en las figuras 18 y 19.

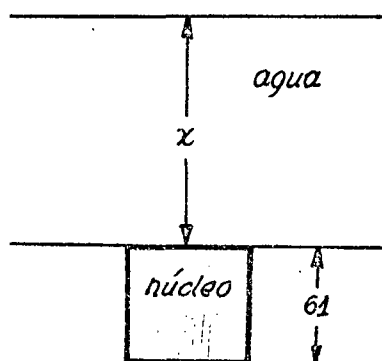
De estas distribuciones se desprende que, para lograr 2.5 mrem/h en la superficie, el blindaje biológico radial a la altura del núcleo debe ser de 2.50 m de hormigón común o bien de 0.20 m de hormigón común (correspondientes a la estructura de sostén del tanque del reactor) y 1.40 m de hormigón pesado.

V.3.- CALCULO DE LA ALTURA DE AGUA

Se realizó un cálculo con el código SABINE-3 para obtener la altura de agua sobre el núcleo necesaria para disminuir la exposición al nivel permitido.

Se utilizaron los datos nucleares de la biblioteca del SABINE-3.

El cálculo se realizó en geometría de disco, con la configuración que se muestra en la siguiente figura:



En la figura 20, se muestra la distribución de exposición en el agua obtenida con este cálculo.

Según esta distribución, la altura de agua por encima del núcleo debe ser de 7 m para asegurar que el valor de la exposición en la superficie no sobrepase los 2.5 mrem/h.

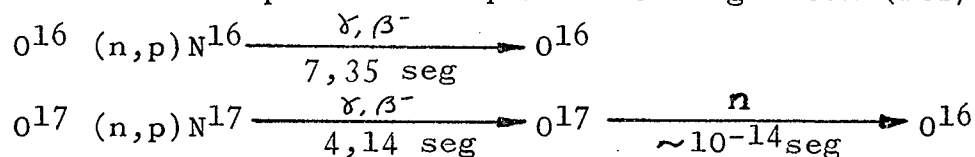
V.4.- DIMENSIONES DEL RECIPIENTE DEL REACTOR

De lo anterior resulta que el recipiente del reactor deberá tener una altura de 9,40 metros, mientras que su diámetro se fijó en 4,00 metros. El espesor supuesto aquí (1 cm) es sumamente preliminar; el espesor definitivo debe resultar del cálculo estructural teniendo en cuenta que la masa de agua es de 118 toneladas.-

CAPITULO VI

" BLINDAJE DEL TANQUE DE DECAIMIENTO - OPCION A (TANQUES CILINDRICOS) "VI.1.- CALCULO DE LA FUENTE

Se consideró que al pasar el medio refrigerante (agua) por el núcleo se activan principalmente dos isótopos del oxígeno, el ^{16}O y el ^{17}O (a los fines del diseño, la actividad del ^{19}O es despreciable). Las reacciones correspondientes que tienen lugar son (ref/14/):



Teniendo en cuenta que el período de la reacción $^{17}\text{O} \rightarrow ^{16}\text{O}$ es despreciable frente a los otros períodos involucrados, podemos plantear las siguientes ecuaciones de balance:

$$\begin{aligned} \dot{N}^{16} &= N^{16} \Delta^{16} \phi - \lambda^{16} N^{16} ; \quad \dot{N}^{17} = N^{17} \Delta^{17} \phi - \lambda^{17} N^{17} \\ \dot{N}^{16} &= -N^{16} \Delta^{16} \phi + \lambda^{16} N^{16} + \lambda^{17} N^{17} ; \quad \dot{N}^{17} = -N^{17} \Delta^{17} \phi \end{aligned}$$

Donde Δ es la sección eficaz de activación efectiva, λ la constante de decaimiento del isótopo radiactivo, ϕ el flujo total promediado en el volumen del núcleo y N la densidad atómica del isótopo.

Teniendo en cuenta que, para ambas reacciones, $\lambda (\sim 0.2 \text{ seg}^{-1}) \gg \Delta \phi (\sim 10^{-12} \text{ seg}^{-1})$ y que la concentración inicial del ^{17}O es despreciable frente a la del ^{16}O , obtenemos la siguiente expresión aproximada (válida para $t \ll 10^{12} \text{ seg}$) para las densidades atómicas del N^{16} y el N^{17} :

$$N^N(t) = N_o^0 \frac{\Delta \phi}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$

En consecuencia, la actividad específica será:

$$A(t) = N_o^0 \Delta \phi (1 - e^{-\lambda t})$$

En el caso más desfavorable ($t \gg \frac{1}{\lambda}$), la actividad específica será la

de "equilibrio":

$$A_{eq} = N_0 \int_0^{\infty} \phi(E) \Delta(E) dE$$

Este es el valor de la actividad del medio refrigerante (agua) al entrar al tanque, que se consideró para el cálculo, a falta de valores del tiempo de pasaje a través del núcleo y tiempo total de permanencia en el circuito de refrigeración.

En la tabla siguiente se consignan los datos necesarios para el cálculo ref. /14/

Nucleo blanco	Vida media del isótopo activado	Sección ef. de activación.	Radiación resultante.	Abundancia isotópica.	Part/des.
O^{16}	7.35 sec	46 mb	de 6.2 Mev (82 %)	99,76 %	0.82
O^{17}	4.14 sec	2.1 mb	n de 0.9 M (100 %)	0.039 %	1.0

Las dos reacciones de activación se producen con neutrones rápidos (>10 Mev) y las secciones eficaces están promediadas sobre la parte del espectro de fisión correspondiente a energías mayores de 11.6 Mev.

El flujo total calculado para 10 Mw es

$$\phi_{total} = 1.46 \times 10^{14} \text{ 1/cm}^2 \text{ seg}$$

y teniendo en cuenta que

$$\phi_{>10 \text{ Mev}} / \phi_{total} \approx 2.6 \times 10^{-4}$$

el flujo interviniente en estas reacciones será:

$$\phi_{>10 \text{ Mev}} = 3.8 \times 10^{10} \text{ 1/cm}^2 \text{ seg}$$

Con estos datos se obtuvieron los siguientes valores de actividad del medio refrigerante (agua) al entrar al tanque:

$$A_{O^{16}} = 5.8 \times 10^7 \text{ desint/seg cm}^3$$

$$A_{O^{17}} = 10.4 \times 10^2 \text{ desint/seg cm}^3$$

El tiempo total de permanencia del medio refrigerante (agua) dentro del tanque hasta su evacuación es de $T = 3$ minutos (ref. /15/)

Llamando z a la distancia medida a partir del punto de entrada (ubicado en el borde superior del tanque) y fijada su altura total h en 7 m, la distribución axial de actividad será $A(z) = A e^{-\lambda z/h} = A e^{-\beta z}$

Para el O^{16} , $\beta = 0.024245$

Para el O^{17} , $\beta = 0.043043$

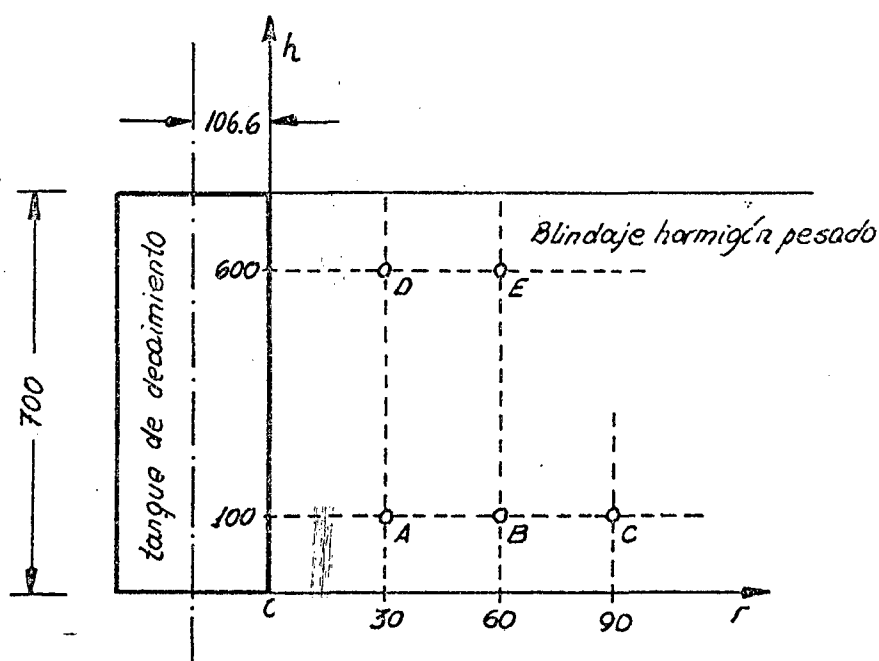
En el caso del O^{16} se producen 0.82 γ por cada desintegración; por lo tanto, llamando F a la cantidad de γ emitidos por cm^3 y por segundo:

$$F(z) = 0.82 A(z)$$

VI.2.- CALCULO DEL BLINDAJE RADIAL

Para calcular el blindaje del tanque de decaimiento cilindrico se utilizó el código MERCURE-4 (ref. /16/) que utiliza la aproximación de atenuación en línea recta con factor de acumulación ("Build-up factor").

En la siguiente figura se muestra la geometría de la fuente y del blindaje, con los puntos en donde se calculó la exposición



Se consideró como fuente a la debida a la actividad gamma del 0^{16} , comparando los valores de actividad de la fuente calculados en VI.1. se concluyó que resulta innecesario, a los fines del diseño, tomar en cuenta la actividad del 0^{17} .

Teniendo en cuenta que el agua entra por $h = 0$, la densidad de fuente será, según lo calculado en VI.1.:

$$F(h) = 4.76 \times 10^7 \cdot e^{(-0.02424 h)} \text{ } \gamma/\text{cm}^3 \text{ seg}$$

Esta densidad corresponde a una potencia de 10 Mw (en este caso, la potencia es sencillamente un factor de normalización; por lo tanto, puede pasarse de los resultados correspondientes a 10 Mw a los resultados correspondientes a cualquier potencia en forma inmediata).

El cálculo se realizó con factor de acumulación homogéneo (ver en ref. /11/), utilizándose el correspondiente al hormigón pesado.

Los coeficientes de atenuación y el factor de acumulación B utilizados son los siguientes:

$$\begin{aligned} \mu_{H_2O} &= 0.00275 \text{ l/cm} & \mu_{H.P.} &= 0.00935 \text{ l/cm} \\ B(\mu x)_{H.P.} &= 2.9 e^{0.082 \mu x} - 1.9 e^{-0.075 \mu x} \end{aligned}$$

Donde μx es el número de caminos libres medios.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

$$\begin{aligned} \text{Exposición (A)} &= 2.18 \times 10^4 \text{ mrem/h} \\ \text{Exposición (B)} &= 12.3 \times 10^2 \text{ mrem/h} \\ \text{Exposición (C)} &= 6.82 \times 10 \text{ mrem/h} \\ \text{Exposición (D)} &= 13.9 \times 10^{-2} \text{ mrem/h} \\ \text{Exposición (E)} &= 7.9 \times 10^{-3} \text{ mrem/h} \end{aligned}$$

Aceptando que en la zona de interés la exposición varía con la distancia al borde del tanque (r) en forma exponencial:

$$E(r, h = \text{cte}) K_1 e^{-\mu^*(r - K_2)} \quad (1)$$

De los resultados anteriores obtenemos:

$$E(A)/E(B) = 17.8 \quad (E)/E(C) = 18.0 \quad E(D)/E(E) = 17.6$$

$$\text{Tomando} \quad [E(r_0)/E(r_0 + 30)]_{\min} = 17.6$$

$$\text{Obtenemos} \quad \mu^* = \ln 17.6 / 30 = 0.096$$

(El coeficiente μ^* tiene en cuenta los efectos de atenuación geométrica y las correcciones por factor de atenuación, además de los efectos de atenuación por colisiones que tiene en cuenta el coeficiente de atenuación μ)

Aceptando que a la exposición en un punto (r_0, h_0) sólo contribuye la fuente en un pequeño entorno de h ; la variación de la exposición con la altura sera exponencial, con una constante de decaimiento igual a la de la fuente.

$$E(r = \text{cte}, h) = K_3 e^{-\beta(h - K_4)} \quad (2)$$

Se calcula β , considerando:

$$[E(h)/E(h + 500)]_{\min} = E(B)/E(E) = 1.56 \times 10^5$$

$$(E(A)/E(D) = 1.57 \times 10^5)$$

$$\text{Luego} \quad \beta = \frac{\ln 1.56 \times 10^5}{500} = 0.024$$

este valor es igual a la constante de decaimiento de la fuente, lo que confirma nuestra hipótesis.

$$\text{De (1) y (2):} \quad E(r + r, h + h) = E(r, h) e^{-(\beta h + \mu^* r)}$$

En particular

$$E(0,0) = E(30,100) e^{(0.024 \times 100 + 0.096 \times 30)} = 4.3 \times 10^6$$

para 10 Mw y blindaje de hormigón pesado

$$E(r, h) = 4.3 \times 10^6 e^{-(0.024 h + 0.096 r)} \text{ mrem/h} \quad (3)$$

De la fórmula (3) pueden obtenerse las superficies de isodosis correspondientes a una exposición E_0 , a una potencia P y blindaje de hormigón pe-

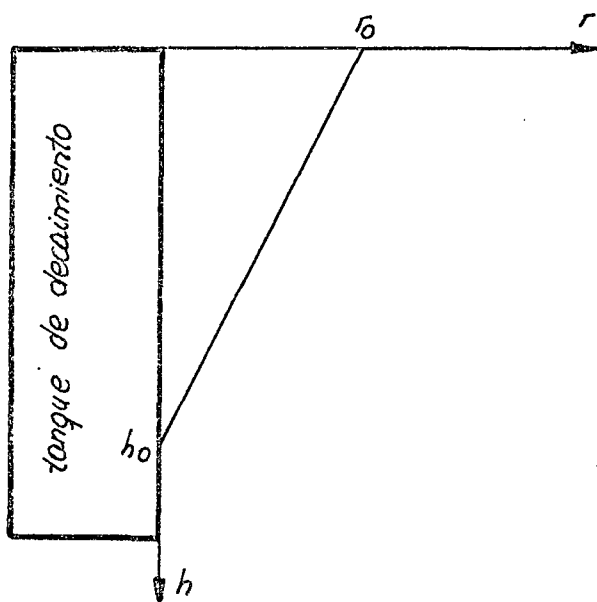
sado:

$$r = \left[\frac{\ln (4.28 \times 10^6 \text{ mrem/h} / E_0 \times P/10 \text{ Mw})}{0.096} \right] - 0.25 h \quad (4)$$

La fórmula (4) puede extenderse al caso de blindajes con otros materiales (por ejemplo: plomo o hierro) considerando, para esta configuración particular, la relación

$$\mu_{\text{mat}}^* = \mu_{\text{H.P.}}^* (\mu_{\text{mat}} \times \rho_{\text{mat}} / \mu_{\text{H.P.}} \times \rho_{\text{H.P.}})$$

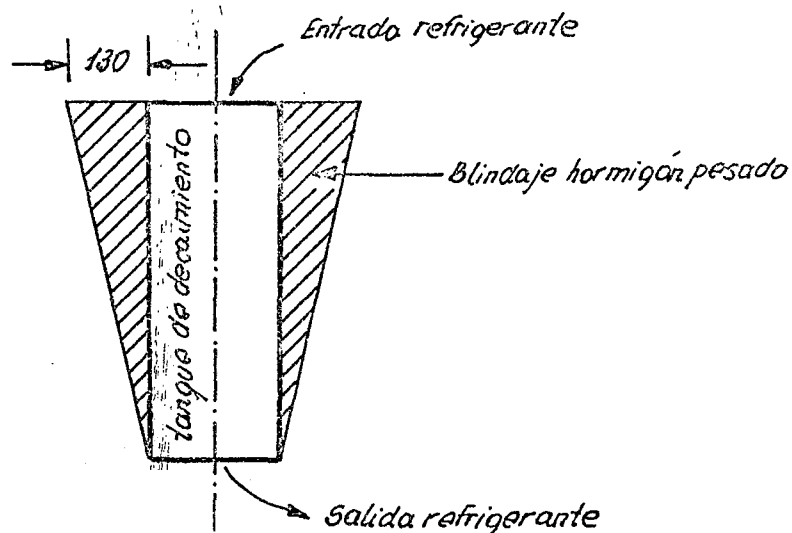
De (4) obtenemos, para una exposición E_0 , una potencia de reactor P y blindaje de hormigón pesado, las siguientes superficies de isodosis:



(E_0 ; P) mrem/h; Mw	r_0 cm	h_0 cm
(15; 5)	124	495
(15; 10)	131	523
(20; 5)	121	480
(20; 10)	128	511

VI.3.- CONCLUSIONES

I.- Para asegurar que la exposición en la superficie del blindaje radial de hormigón pesado no sobrepase los 15 mrem/h a una potencia de 10 Mw, éste deberá tener como mínimo el espesor y configuración indicados en la figura siguiente



II.- Como hemos visto, la exposición en la superficie del tanque disminuye en el sentido del recorrido del medio refrigerante y a 523 cm de la entrada este valor es de 15 mrem/h siendo a la salida del tanque, de sólo 0.2 mrem/h

En consecuencia, desde el punto de vista de lograr la disminución de actividad del medio refrigerante por almacenamiento, este tanque estaría sobredimensionado, ya sea en longitud o en tiempo de circulación.

III.- A fin de reducir el espesor de hormigón pesado, cabría replantear si es necesario que la exposición sea de 15 mrem/h en toda la superficie lateral o si en correspondencia con la zona de mayor intensidad de fuente (porción superior del recipiente) pueden plantearse áreas inaccesibles durante el funcionamiento del reactor.

IV.- En caso que se juzgue conveniente ubicar los tanques verticalmente junto a la piscina, se sugiere la configuración mostrada en las figuras 21 y 22 para una potencia de 10 Mw.

Los espesores de material indicados corresponden a los mínimos necesarios para asegurar los valores de exposición propuestos.

Según sea la ubicación del tanque dentro de la instalación, hay que fijar las exposiciones permisibles en la zona inmediata a la parte superior del tanque. En forma estimativa, puede suponerse que el espesor necesario en esa zona sea también de 1.30 de hormigón pesado, reemplazables v.g. por 15 cm de Pb y 85 cm de ese hormigón.

CAPITULO VII

BLINDAJE DEL TANQUE DE DECAIMIENTO - OPCION B

Como opción a los tanques de geometría cilíndrica, se estudiaron los blindajes para tanques de decaimiento con la forma mostrada en las figuras 23 y 24. En estas figuras se muestra también una posible configuración del conjunto reactor-tanques de decaimiento.

VII.1.- DATOS DEL CALCULO

I) Datos geométricos:

Se calculó el blindaje de hormigón pesado de un tanque de decaimiento con la geometría indicada en la parte rayada de la figura 23 y en la figura 24. Se consideró un área transversal de 55452 cm^2 y una altura de 451 cm (necesaria para que el volumen del tanque sea de 25 m^3) (Ref./13/)

II) Datos nucleares:

Se utilizaron los mismos datos nucleares (coeficientes de atenuación y factor de acumulación) consignados en VI.2.

III) Distribución espacial de fuente:

$$F(x,y,z) = 4.76 \times 10^7 e^{-0.0376 \gamma/\text{cm}^3} \text{ (fotones de 6.2 Mev)}$$

(Los coeficientes de ésta fórmula fueron determinados mediante el procedimiento descrito en VI.1. y corresponden a una potencia de 10 Mw)

VII.2.- PRESENTACION Y DISCUSION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Se calcularon las exposiciones en 22 puntos del blindaje. Los resultados se muestran en las tablas III y IV.

Se puede observar que los resultados obtenidos para el blindaje del lado 1 son prácticamente los mismos que los obtenidos para

el lado 2; por lo tanto las conclusiones serán comunes para ambos lados.

También puede observarse que las máximas exposiciones se dan prácticamente en la zona media ($y = 153$ para el lado 1 y $x = 230$ para el lado 2) del tanque; por tal motivo sólo se calcularon distribuciones de exposición en esa zona (ver figura 25)

Las curvas A, B y C de la figura 25 representan las distribuciones espaciales de exposición según el espesor del blindaje, para 45.1 cm, 226 cm y 406 cm de distancia a la entrada del agua refrigerante respectivamente; como ya se indicó, todas las exposiciones corresponden a la zona media del tanque.

Las curvas E y F de la figura 25 representan las distribuciones según la altura del tanque, correspondientes a 100 cm y 150 cm de espesor del blindaje respectivamente.

A partir de las curvas E y F se extrapolaron cotas máximas de la exposición para 100 cm y 150 cm de espesor de blindaje. La distribución de estas cotas máximas según el espesor del blindaje se muestra en la curva D.

VII.3.- CONCLUSIONES

I) Mediante el empleo de la curva D de la figura 25 puede determinarse el espesor de blindaje de hormigón pesado correspondiente a cualquier valor de exposición máxima para una potencia de 10 Mw

II) Para lograr 2.5 mrem/h de exposición máxima en la superficie del blindaje se necesitan aproximadamente 140 cm de hormigón pesado. (Ver curva D de la figura 25).

III) Por extrapolación de las curvas B y C de la figura 25 se estimó la distribución de exposición en el borde lateral del tanque (curva G de la figura 25). A partir de la curva G se determinó que a la salida del tanque hay aproximadamente 0.5 mrem/h en el borde y a 355 cm de la entrada hay 15 mrem/h en el borde. Luego, desde el punto de vista de lograr la disminución de actividad del medio

refrigerante por almacenamiento, este tanque estaría sobredimensionado, ya sea en longitud o en tiempo de circulación.

IV) De acuerdo a lo visto en V.2. y en este capítulo, con la configuración del conjunto reactor-tanques de decaimiento mostrada en las figuras 23 y 24 se logra disminuir la exposición a 2.5 mrem/h con 140 cm de hormigón pesado a ambos lados de los tanques de decaimiento ($\alpha = \beta = 140$ cm); mientras que para llegar a 15 mrem/h basta con 120 cm de hormigón pesado.

" REFERENCIAS "

- /1/ - D. Parkansky, "Estudio del aumento de potencia del Reactor R.A.-3",
CNEA-Re-36 (1969)
 - D. Parkansky, "R.A.-3 TERMIC I, Código de Cálculo", CNEA-Re-53 (1972)

- /2/ - F. Merchie, "Etude thermique de l'augmentation de puissance de Siloé"
CEA-CENG-Service des Piles, Pi(NI) 760-I314 (1965)
 - F. Merchie, "Détermination et calcul thermique du canal chaud de Siloé
à 30 Mw", CEA-CENG-Service des Piles, Pi(NI) 760-95 (1968).

- /3/ Informe de Seguridad del Reactor R.A.-3 (1973)

- /4/ - R. Alpiar, "METHUSELAH I, A universal assessment programme for liquid
moderated reactor cells", AEEW-R.135 (1963)
 - M. J. Brinkworth, J. A. Griffiths, "METHUSELAH II-A, FORTRAN program
and nuclear data library for physics assessment of liquid moderated
reactors", AEEW-R-480 (1966)

- /5/ P. Ageron et al, "Rapport de Sureté de Siloé", CENG Rapport CEA-2307
(1963)

- /6/ T.B. Fowler and M. L. Tobias, "EQUIPOISE-3, A two dimensional two-group
neutron diffusion code", ORNL-3199 (1962)

- /7/ F. R. Allen, "ZADOC, A two group, two dimensional fuel management pro-
gramme for IBM 7090 or STRECH", AEEW-R425 (1965)

- /8/ H. Schilman, comunicación privada.

- /9/ L. de Porto, M. Bang, J. J. Gil Gerbino. Flujo de neutrones en el núcleo y facilidades de irradiación en el R.A.-3 CNEA-Re-57 (1971)
- /10/ M. Bang, comunicación personal
- /11/ C. Ponti, H. Preusch, H. Schubert, SABINE. A One Dimensional Bulk Shielding Program EUR3636 (1967)
- /12/ R. L. Walker, M. Grotenhuis. A Summary of shielding constants for concrete, ANL-6443 (1961)
- /13/ H. Rapoport, Comunicación personal.
- /14/ B. T. Price, C. C. Horton, Radiation Shielding. Pergamon Press (1957)
- /15/ D. Parkansky, comunicación personal
- /16/ C. Devillers, C. Dupont, Manuel d'utilisation du programme MERCURE-4 (Version M25), Rapport SERMA/S N° 168 (1973)

ANEXO I

"PARAMETROS PRINCIPALES DEL REACTOR"

Se resumen los parámetros más importantes del reactor. Entre paréntesis se indica el capítulo y sección donde aparece desarrollado o mencionado cada uno de ellos.

A I.1.- Parámetros Generales

Tipo de reactor: Tipo piscina. Combustible tipo MTR con U enriquecido al 90 % en U^{235} . Agua liviana como moderador, refrigerante, reflector y blindaje biológico. Núcleo rodeado por un reflector de bloques de grafito y por cajas de irradiación de producción de radioisótopos.

Propósito: Experimentación, prueba e irradiación de materiales, producción de radioisótopos.

Potencia nominal (I.): 10 Mw

A I.2.- Reactor

Recipiente(V.4): de acero inoxidable;

H = 940 cm

D = 400 cm

Espesor = 1 cm

Masa de agua en el recipiente (V.4): 118.1 Tn

Temperatura media del agua en el recipiente: 45 - 50 °C

Exposición en la superficie superior(V.3): < 2.5 mR/h

Blindaje lateral (V.2): 20 cm de hormigón común ($\rho = 2.2 \text{ g/cm}^3$)
 más 140 cm de hormigón pesado ($\rho = 3.49 \text{ g/cm}^3$)

Exposición en la superficie lateral (V.2): < 2.5 mR/h

A I.3.- Núcleo (En condiciones de quemado en equilibrio y funcionamiento a plena potencia)

Carga (II,III,IV): 24 E.C. normales,
4 E.C. con barras
Reflector de grafito (III,IV): 20^a - 22 bloques
Cajas de irradiación (III): ~ 6
Barras (III): 4 de control y seguridad
1 de pilotage.
Volumen nominal zona físil (III.5): 105,4 litros
Masa de U (enriquecido al 90 % en
U²³⁵) (II.1): 6,04 Kgr
Densidad de potencia media (III.5): 94,91 W/cm³
Factor de forma total (IV.4): 2.0
Quemado medio del núcleo en equilibrio (IV.4): 70.000 a 100.000 MWd/T.U.
quemado de extracción (IV.4): ~ 200.000 MWd/T.U.
Recarga de combustible (IV.4): ~ 1 E.C. cada 4,5 d.p.p. (10MW)
Requerimiento de U por año a plena potencia (IV.5): 25 Kgr

A I.4.- Reactividades y flujos

Supercriticidad del núcleo para combustible fresco, frío (III.3): 13600 pcm
Antireactividad por Xe, Sm y temperatura a plena potencia (III.3): 4.400 pcm
Antirreactividad estimada de instrumentación y estructuras (III.3): ~ 2.000 pcm
Reserva para evolución de Xe (III.3): 1.700 pcm
Reactividad mínima del núcleo, a plena potencia (III.3): $\delta k_{eff} = 4 \%$.

Antirreactividad de barras (III.3):	15.000 pcm
Flujo rápido máximo (III.4):	$3,2 \times 10^{14}$ n/cm ² seg
Flujo térmico máximo (III.4):	$1,4 \times 10^{14}$ n/cm ² seg
Flujo rápido medio en la zona físil (III.4):	$1,64 \times 10^{14}$ n/cm ² seg
Flujo térmico medio en la zona físil (III.4):	$6,6 \times 10^{13}$ n/cm ² seg
Espectro, relación ϕ_r / ϕ_e (II.5):	2,35 (quemado de extrac- ción) 3,13 (combustible fresco)

A I.5.- Refrigeración del núcleo

Superficie total zona físil (II.1):	37,76 m ²
Flujo calórico máximo tolerado, ($F_q = 2.5$) (I):	66 W/cm ²
Flujo calórico máximo en operación nominal ($F_q = 2.0$) (III.5):	52 W/cm ²
Flujo calórico medio (III.5):	26 W/cm ²
Temperatura máxima de vaina (I):	110 °C
Caudal de refrigerante (I):	1100 m ³ /h
Velocidad de refrigerante (I):	2,25 m/seg
Temperatura de entrada (I):	45 °C

A I.6- Tanques de Decaimiento y Blindajes

Número de tanques (VII):	2
Volumen de cada tanque (VII.1.):	25 m ³
Volumen mínimo necesario de cada tanque (VII.3.)	20 m ³
Blindajes de los tanques (VII.3.):	140 cm de hormigón pesado ($\rho = 3.49$ g/cm ³)
Exposición en la superficie lateral (VII.3):	< 2.5 mR/h

ANEXO II

" RESUMEN DE CARACTERISTICAS DEL NUCLEO

Se resumen a continuación un conjunto de características y parámetros físicos del núcleo. Toda la información aquí consignada se encuentra desarrollada convenientemente en las secciones indicadas en cada caso entre paréntesis, a ellas debe referirse el lector para una mejor comprensión. Los datos que se refieren al reactor, salvo indicación contraria, corresponden a la configuración Conf.3.

AII.1.-PARAMETROS TERMOHIDRAULICOS

Potencia total (I.)	10 Mw
Velocidad mínima de circulación del refrigerante (NB-20)(I.)	2,25 m/seg
Caudal del refrigerante (NB-20)(I.)	1.100 m ³ /h
Temperatura de entrada del refrigerante (NB-20)(I.)	45 °C
Temperatura de vaina máxima (NB-20)(I.)	110 °C
Factor de forma total máximo supuesto (NB-20)(I.)	2,5
Flujo calórico máximo tolerado (NB-20)(I.)	66 W/cm ²
Potencia específica máxima tolerada (NB-20)(I.)	315,8 W/cm ³
Potencia específica media III.5	94,91 W/cm ³

AII.2.-CARACTERISTICAS FISICAS DEL ELEMENTO COMBUSTIBLE

Composición del combustible (II.1)	Al-U
Enriquecimiento del uranio en U ²³⁵ (II.1)	90 %

Composición de la vaina (II.1)	Al
Composición del moderador y refrigerante (II.1)	Agua liviana
Masa de U^{235} en una lámina combustible (II.1)	10,53 gr
Porcentaje en peso correspondiente (II.1)	16,8 %
Masa de U^{238} en una lámina combustible (II.1)	1,17 gr
Porcentaje en peso correspondiente (II.1)	1,9 %
Masa de uranio en una lámina combustible (II.1)	11,70 gr
Porcentaje en peso correspondiente (II.1)	18,7 %
Masa de aluminio en una lámina combustible (II.1)	50,80 gr
Porcentaje en peso correspondiente (II.1)	81,3 %
Masa de U^{235} por caja (II.1)	200gr
Masa de Uranio por caja (II.1)	222 gr
Masa de combustible (Al-U) por caja (II.1)	1187 gr
Dimensiones de las láminas combustibles (II.1)	615 x 59,5 x 0,54 mm
Dimensiones de las placas (II.1)	755 x 70,5 x 1,38 mm
Dimensiones de la sección de las cajas (II.1)	76,2 x 80,3 mm

Número de placas en cada caja normal (II.1)	19
Número de placas en cada caja con barras (II.1)	15
Separación entre placas (II.1)	4,18 mm
Límites del grupo rápido (II.5)	0,625 eV a 10 MeV
Límites del grupo térmico (II.5)	0 eV a 0,625 eV
Espectro de la celda para combustible fresco (II.5): grupo rápido	75,8 %
grupo térmico	24,2 %
ϕ_1/ϕ_2	3,13
Espectro de la celda con combustible irradiado a $Q = 33768 \text{ MWd/T.C.}$ $= 180659 \text{ MWd/T.U. (II.5).....}$	
grupo rápido	70,3 %
grupo térmico	29,7 %
ϕ_1/ϕ_2	2,37
Relación flujo rápido en combustible a flujo rápido en refrigerante (II.5)	1.0
Relación flujo térmico en combustible a flujo térmico en refrigerante (II.5)	0.95

AT.3.- PARAMETROS NEUTRONICOS DEL NUCLEO

Número de cajas normales (III.1)	24
Número de cajas con barras (III.1)	4
Número de bloques reflectores de grafito (III.1)	20
Masa de combustible (II.1)	32.25 Kg.
Masa de uranio (II.1)	6.04 Kg.
Masa de U^{235} (II.1)	5.43 Kg
Exceso de reactividad del núcleo fresco s/b (NB-20) (III.3) (sin potencia)	13.600 pcm
Exceso de reactividad con quemado medio $\bar{Q} = 14000$ MWd/T.C. s/b (comienzo de un ciclo) (III.3) (plena potencia).	5.600 pcm
Valor del banco de barras (núcleo en equilibrio) (III.3)	15.000 pcm
Valor del Xe y Sm en equilibrio a plena potencia (NB-20) (III.3)	4.200 pcm
Antirreactividad estimada de la instrumentación y estructuras (III.3)	1.800 pcm
Antirreactividad del Xe acumulada 13 hs. después de un corte (III.3)	1.700 pcm
Exceso mínimo de reactividad del núcleo libre de instrumentación y estructuras (III.3)	3.500 pcm
Flujo máximo en el centro de las cajas s/b (III.4)	4.6×10^{14} n/cm ² .seg

Flujo rápido máximo en el centro de las cajas s/b (III.4)	$3.2 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \text{ seg}$
Flujo térmico máximo en el centro de las cajas s/b (III.4)	$1.4 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \text{ seg}$
Factor de forma total (Núcleo en equilibrio)(IV.4)	2.0 (± 1 %)
Flujo medio rápido en la zona físil (III.4)	$1.64 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \text{ seg}$
Flujo medio en la zona físil (III.4)	$2.30 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \text{ seg}$
Flujo medio térmico en la zona físil (III.4)	$0.66 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \text{ seg}$
Flujo rápido medio en el centro de cajas de irradiación ubicadas en zonas externas al reflector (III.4)	$0.6 - 3. \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ seg}$
Flujo térmico en el centro de cajas de irradiación ubicadas en zonas externas al reflector (III.4)	$2 - 5 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ seg}$
Inhomogeneidad del flujo en una caja de irradiación (III.4)	500 %
ϕ_1 / ϕ_2 en el centro del reactor (III.4)	2.5
ϕ_1 / ϕ_2 en zonas del reflector de H ₂ O alejadas del núcleo del reactor (III.4)	0.35

A II.4 CARACTERISTICAS DEL NUCLEO EN EQUILIBRIO Y MOVIM. DE COMB.

Factor de conversión entre T.U. y T.C. (II.1)	5.35 T.C./T.U.
Factor de conversión entre T. ^{U5} y T.C. (II.1)	5.95 T.C./T.U.

Potencia específica máxima en el centro de una caja C5 (centro del reactor) (III.5)	245 W/cm ³
Ritmo de quemado medio en el núcleo (IV.4)	315 MW/T.C.
Período del ciclo al final del cual se extraen cuatro E.C. normales (IV.5)	16 dpp
Período del macrociclo que incluye el recambio de E.C. con barras (IV.5)	65 dpp
Quemado de extracción (IV.4)	35.100 MWd/T.C.
o bien	187785 MWd/T.U.
Quemado medio al iniciar un ciclo (IV.4)	12.600 MWd/T.C.
o bien	67.410 MWd/T.U.
Quemado medio al finalizar un ciclo (IV.4)	18.700 MWd/T.C.
o bien	100.045 MWd/T.U.
Pérdida de reactividad por unidad de tiempo (IV.4)	89 pcm/dpp
Pérdida de reactividad por unidad de quemado (IV.4)	0.282 pcm/MWd/T.C.
o bien	1.51 pcm/MWd/T.U.
Requerimiento de E.C. normales por año a plena potencia (IV.6)	91 cajas
Requerimiento de E.C. con barras por año a plena potencia (IV.6)	23 cajas

Requerimiento de uranio enriquecido al

90 % por año a plena potencia

25 Kg.

Q (Mwd/T.U.)	Q (Mwd/T.C.)	$\xi(\%)$ U ²³⁵	$\xi(\%)$ U ²³⁸	$\xi(\%)$ Pu ²³⁹	$\xi(\%)$ Sm ¹⁴⁹	$\xi(\%)$ Xe ¹³⁵	$\delta(\%)$ U ²³⁵	$\delta'(\%)$ Pu ²³⁹
.0	.0	16.13	1.792	.0	.001438	.0000962	.0	.0
22600	4220	15.59	1.789	.00339	.001393	.0000933	3.35	.0210
45200	8440	15.04	1.785	.00655	.001345	.0000904	6.76	.0406
67700	12700	14.50	1.781	.00948	.001297	.0000875	10.10	.0588
90300	16900	13.96	1.778	.01219	.001249	.0000845	13.45	.0756
113000	21100	13.42	1.774	.01468	.001201	.0000815	16.80	.0910
135000	25300	12.88	1.771	.01695	.001153	.0000785	20.1	.1050
158000	29500	12.34	1.767	.01900	.001105	.0000755	23.5	.1178
181000	33800	11.80	1.763	.0208	.001057	.0000724	26.8	.1292
203000	38000	11.26	1.760	.0225	.001009	.0000694	30.2	.1393

TABLA I. COMPOSICION ISOTOPICA DEL COMBUSTIBLE EN FUNCION DEL QUEMADO

(Ver definici3n de $\xi(\%)$, $\delta(\%)$, $\delta'(\%)$ en secci3n II.3)

MATERIAL	GRUPO	D [cm]	$\sum a$ [cm ⁻¹]	$\sum R$ [cm ⁻¹]	$\nu \sum f$ [cm ⁻¹]
Combustible * (núcleo fresco)	{ 1	1.486	0.002017	0.02720	0.002709
	{ 2	0.2844	0.07734	-----	0.1213
Grafito	{ 1	1.1400	0.000013	0.003940	-----
	{ 2	0.8457	0.0002850	-----	-----
Agua liviana	{ 1	1.4000	0.0008740	0.04377	-----
	{ 2	0.1335	0.01922	-----	-----
Barras	{ 1	1.400	0.04000	0.04377	-----
	{ 2	-----	0.5	-----	-----

* Constantes utilizadas en los casos NB-20 y Conf.2.-

TABLA II. CONSTANTES DE CELDA UTILIZADAS EN LOS CALCULOS DE REACTOR

COORDENADAS DEL PUNTO (x(cm), y(cm), z(cm))	EXPOSICION (mrem/h)
(455. 153. 45.1)	5.36 x 10
(505. 153. 45.1)	5.18 x 10 ⁻¹
(455. 153. 226.)	3.08 x 10 ⁻¹
(505. 153. 226.)	4.48 x 10 ⁻³
(455. 153. 406.)	4.32 x 10 ⁻⁴
(505. 153. 406.)	6.04 x 10 ⁻⁶
(455. 61. 45.1)	4.94 x 10
(505. 61. 45.1)	4.54 x 10 ⁻¹
(455. 244. 45.1)	4.76 x 10
(505. 244. 45.1)	4.88 x 10 ⁻¹
(505. 405. 45.1)	5.57 x 10 ⁻³

TABLA III : EXPOSICION EN DISTINTOS PUNTOS DEL BLINDAJE DEL TANQUE DE
DECAIMIENTO (OPCION B) - LADO 1.

COORDENADAS DEL PUNTO (x(cm), y(cm), z(cm))			EXPOSICION (mrem/h)
(230.	355.	45.1)	6.06×10^3
(230.	405.	45.1)	5.32×10
(230.	455.	45.1)	4.70×10^{-1}
(230.	405.	226.)	3.18×10^{-1}
(230.	455.	226.)	4.30×10^{-3}
(293.	405.	406.)	4.68×10^{-4}
(293.	455.	406.)	6.16×10^{-6}
(168.	355.	45.1)	5.62×10^3
(168.	405.	45.1)	4.88×10
(293.	355.	45.1)	5.58×10^3
(293.	405.	45.1)	4.86×10

TABLA IV: EXPOSICION EN DISTINTOS PUNTOS DEL BLINDAJE DEL TANQUE
DE DECAIMIENTO (OPCION B) - LADO 2.

ELEMENTO COMBUSTIBLE

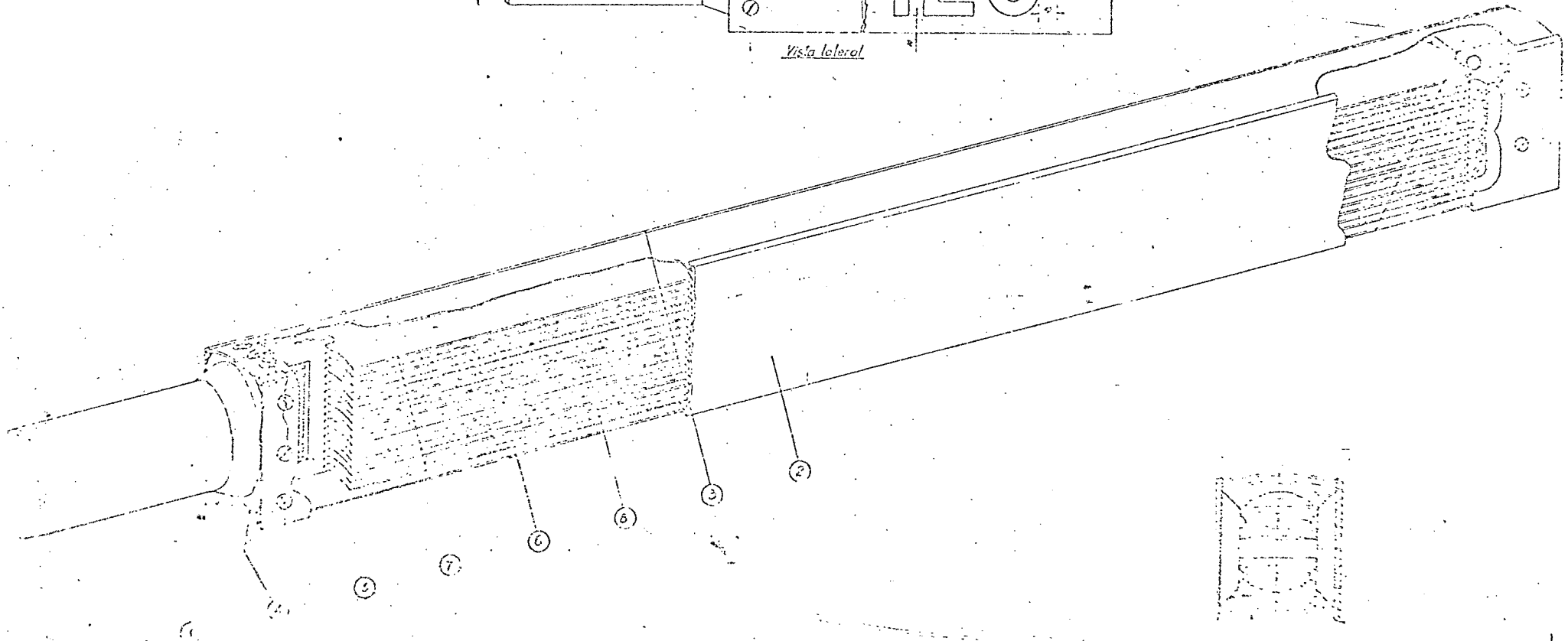
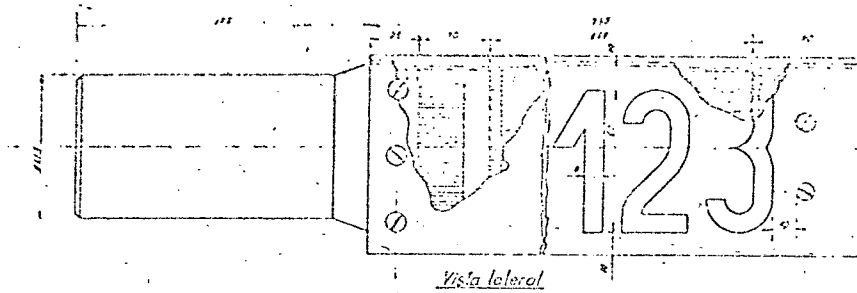


FIGURA 1.- ESQUEMA DE UNA CAJA COMBUSTIBLE.

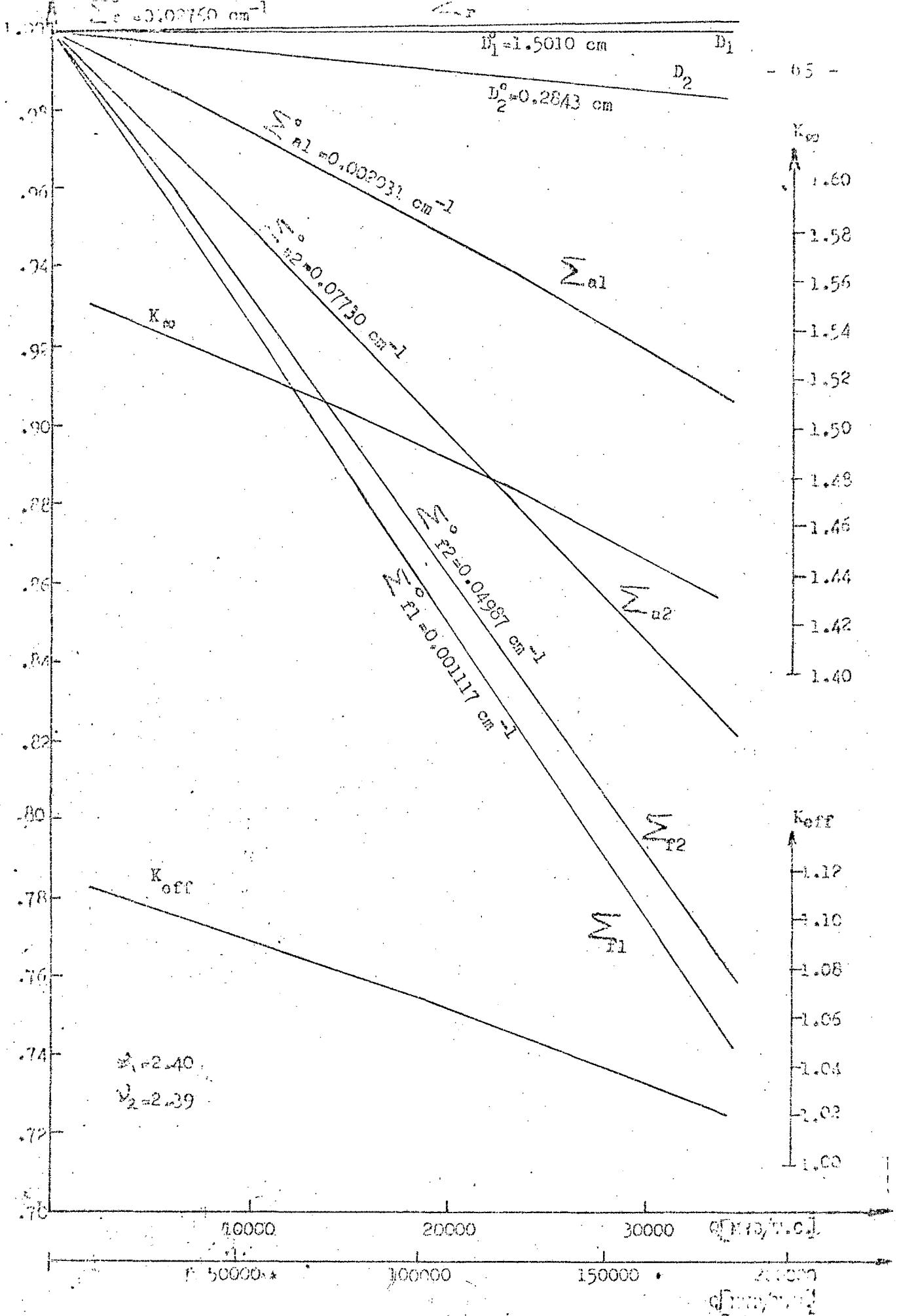
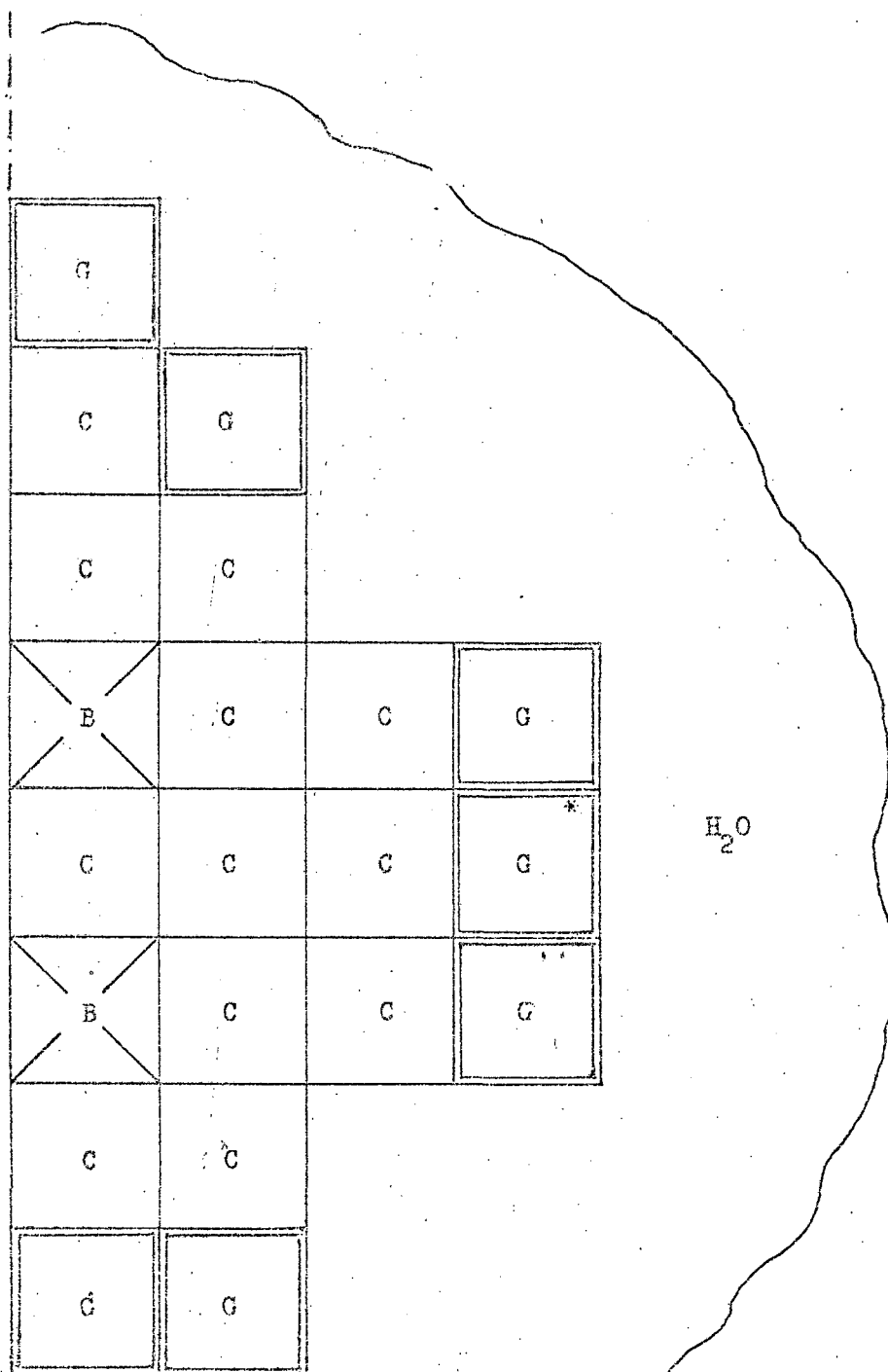
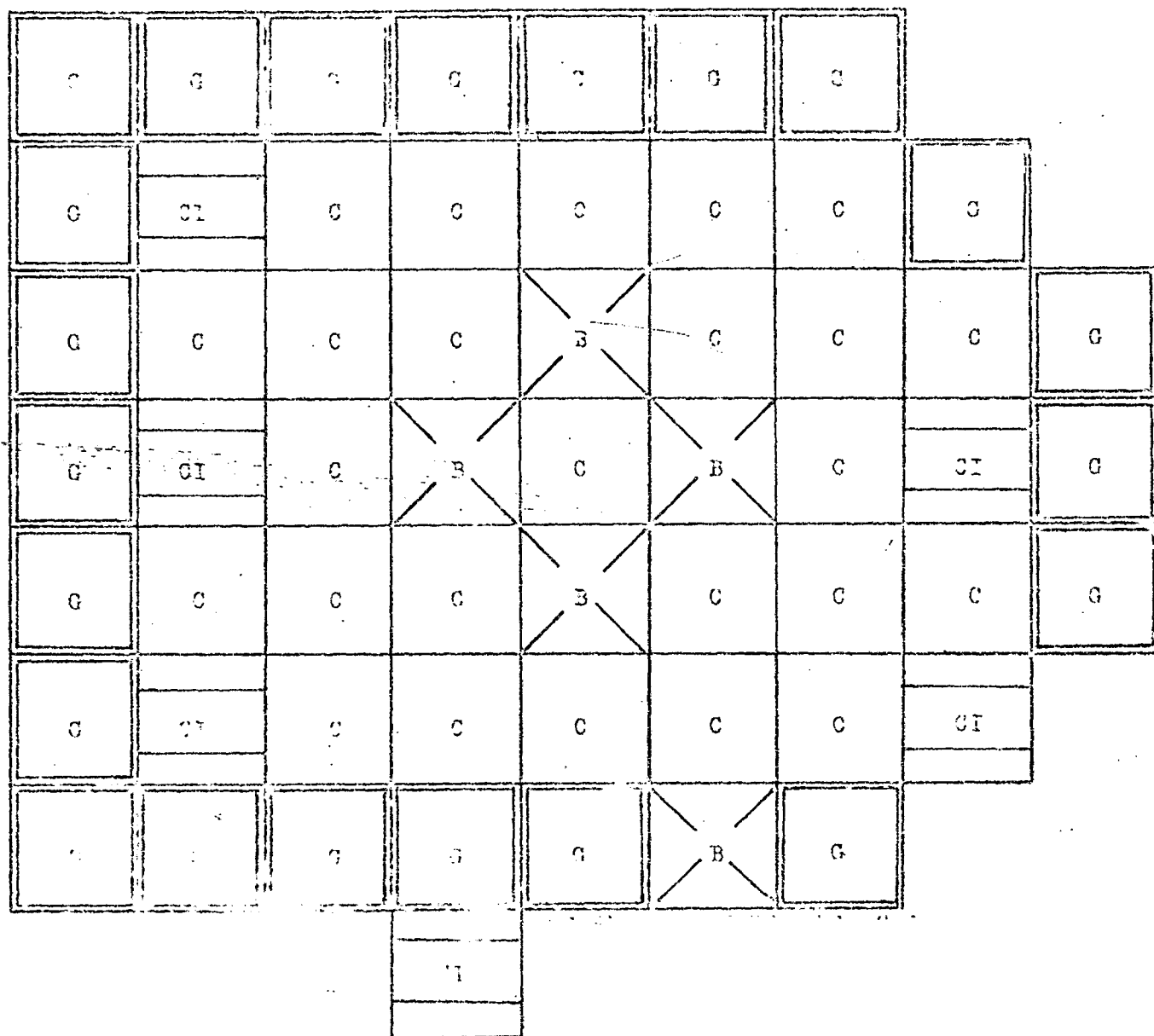


FIGURA 2.- RELACION CON LA IRRADIACION DE LAS CONSTANTES NEUTRONICAS A LOS FACTORES DE MULTIPLICACION K_{∞} Y K_{off}



* El bloque reflector simétrico contiene una barra de pilotaje.-

FIGURA 3.- ESQUEMA DE LA CONFIGURACION NB-20 INDICANDO LA POSICION DE LOS ELEMENTOS COMUTABLES, LAS BARRAS DE CONTROL Y LOS REFLECTORES.



H₂O

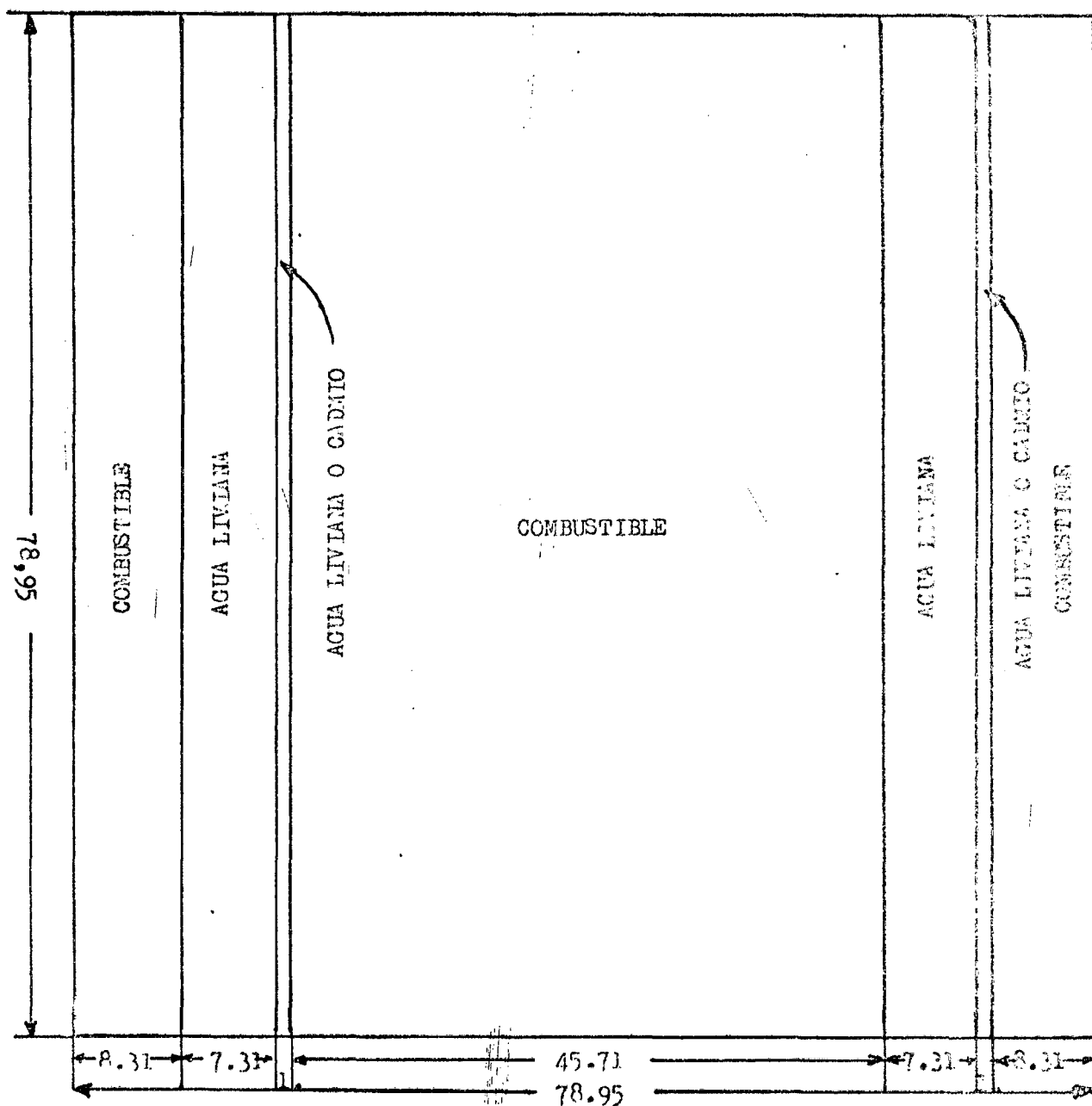


FIGURA 6.- ESQUEMATIZACION DE LAS CAJAS COMBUSTIBLES CON BARRAS DE CONTROL Y SEGURIDAD ADOPTADA EN LOS CALCULOS DE REACTOR.

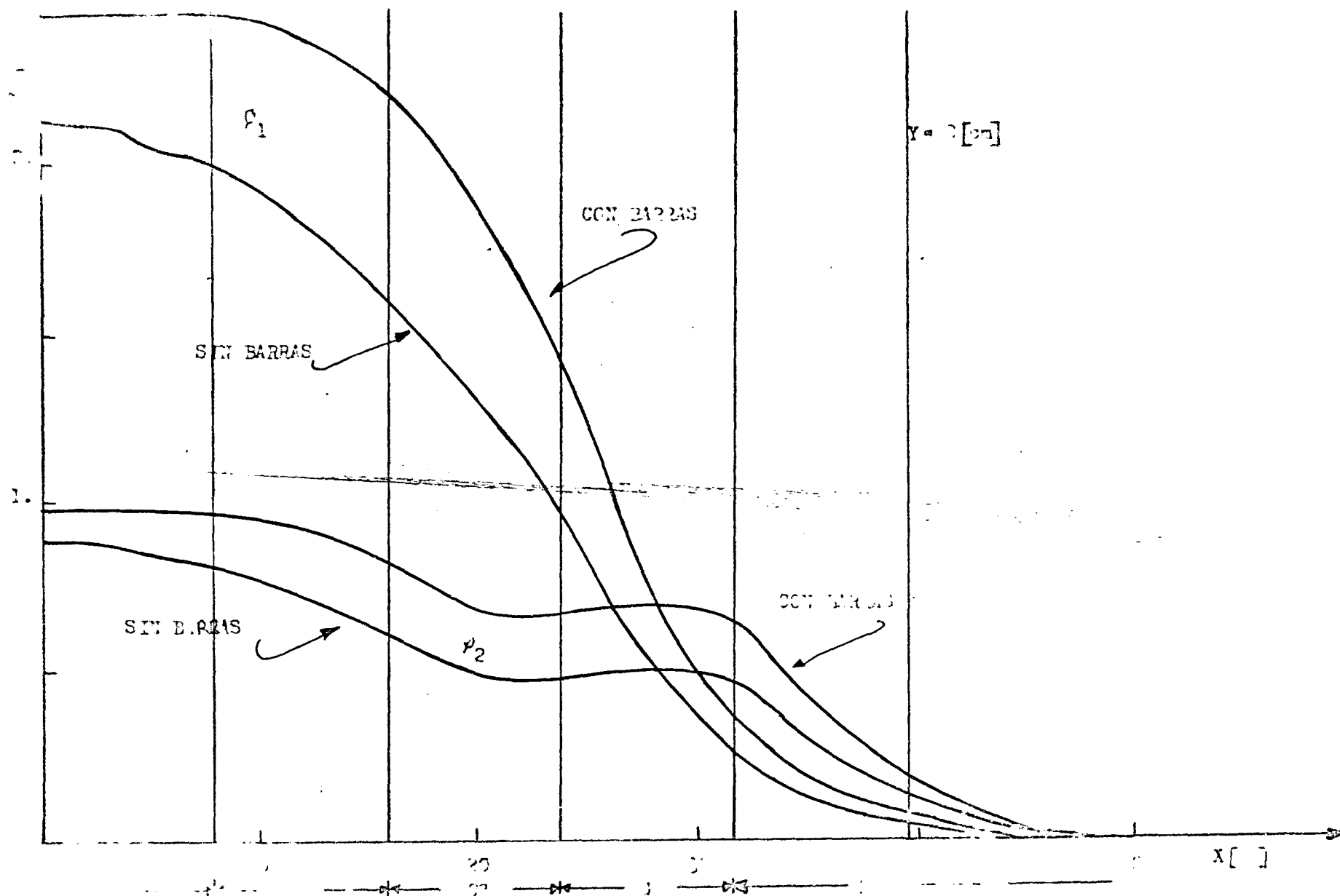


FIGURA 5B. - EL EFECTO DE LA PRESION SOBRE EL EJE "X" INDICADO EN LA FIGURA 5A.

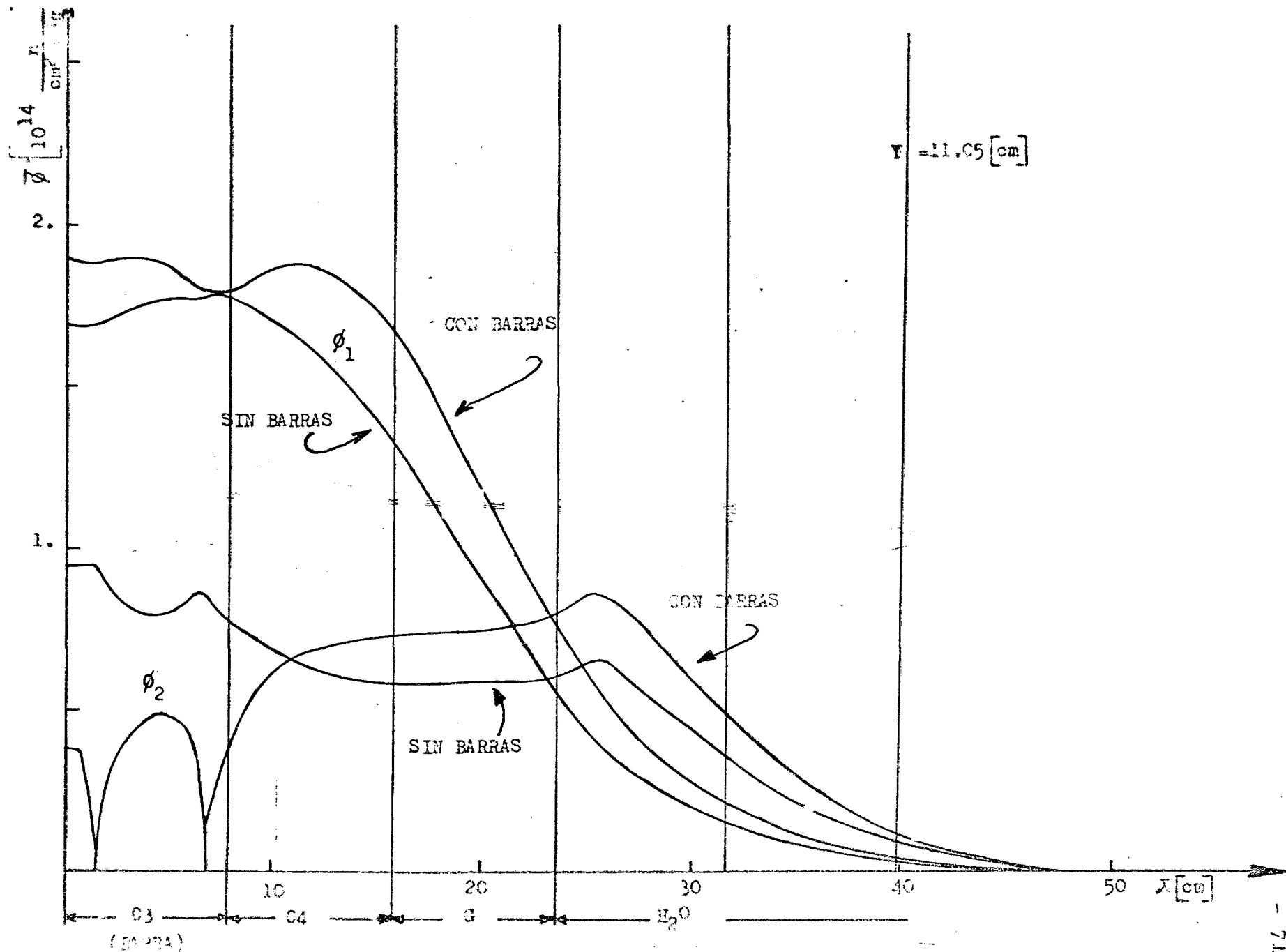


FIGURA 8.- PERFILES DE FLUJOS SOBRE EL EJE "b" INDICADO EN LA FIGURA 5B.

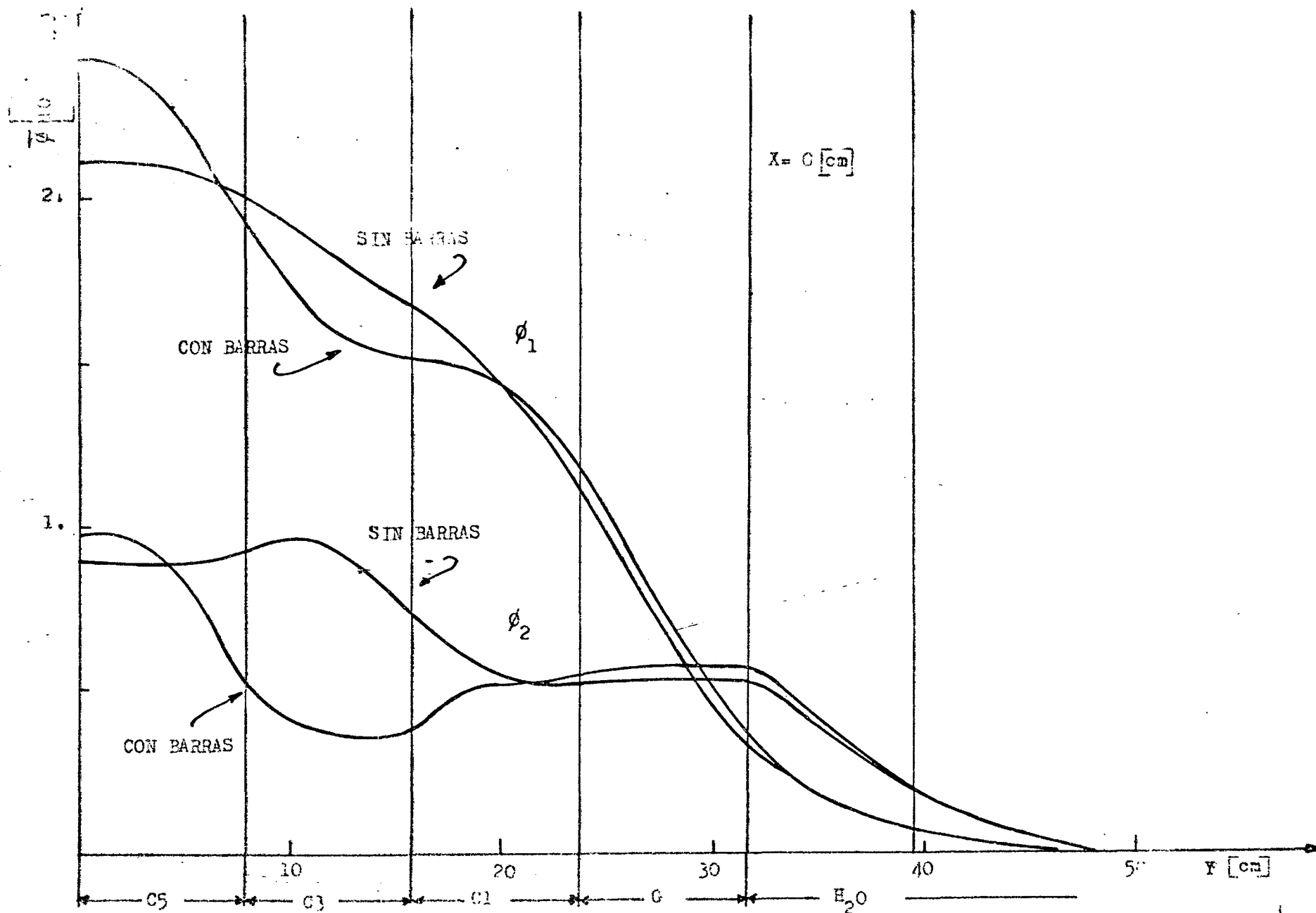


FIGURA 2.- PERFILES DE FLUJOS SOBRE EL EJE "c" INDICADO EN LA FIGURA 5B.

0.0263	0.0201	0.0113	0.00488	0.0017	0.00040
0.0723	0.0560	0.0322	0.0141	0.0050	0.0012
0.153	0.115	0.0578	0.0219	0.0070	0.0015
0.346	0.277	0.156	0.0621	0.0202	0.0044
0.670	0.512	0.206	0.0644	0.0180	0.0037
0.522	0.480	0.423	0.173	0.0514	0.0107
1.425 ^{C1}	1.180 ^{C2}	0.566	0.0148	0.0382	0.0075
0.549	0.452	0.528	0.352	0.107	0.0215
1.854 ^{C3}	1.582 ^{C4}	0.910	0.282	0.0712	0.0131
0.786	0.625	0.590	0.548	0.190	0.0373
2.07 ^{C5}	1.811 ^{C6}	1.292 ^{C7}	0.528	0.110	0.0184
0.869	0.721	0.499	0.499	0.271	0.0517

FIGURA 10.- VALORES DE LOS FLUJOS MEDIOS RAPIDO (VALOR SUPERIOR) Y TERMICO (VALOR INFERIOR) EN EL CENTRO DE CADA "CAJA" (VER SECCION II.4), EN EL CASO CON BARRAS TOTALMENTE EXTRAIDAS EN UNIDADES DE 10^{14} NEUTRONES /CM²SEG.

0.0287	0.0224	0.0130	0.0057	0.0021	0.00048
0.0789	0.0624	0.0370	0.0166	0.0060	0.0014
0.166	0.129	0.0671	0.0261	0.0085	0.0019
0.376	0.310	0.180	0.0741	0.0247	0.0055
0.721	0.583	0.245	0.0787	0.0226	0.0047
0.563	0.539	0.501	0.212	0.0646	0.0136
1.447 ^{C1}	1.354 ^{C2}	0.691	0.1884	0.0501	0.0100
0.518	0.505	0.647	0.445	0.140	0.0287
1.703 ^{C3}	1.811 ^{C4}	1.180	0.383	0.0982	0.0181
0.444	0.657	0.753	0.739	0.261	0.0516
2.321 ^{C5}	2.306 ^{C6}	1.838 ^{C7}	0.758	0.157	0.0261
0.931	0.893	0.695	0.698	0.383	0.0731

FIGURA 11.- VALORES DE LOS FLUJOS MEDIOS RAPIDO (VALOR SUPERIOR) Y TERMICO (VALOR INFERIOR) EN EL CENTRO DE CADA "CAJA" (VER SECCION II.4), EN EL CASO CON BARRAS TOTALMENTE INSERTADAS, EN UNIDADES DE 10^{14} NEUTRONES/ CM^2 SEG.

0.36 0.36	0.36 0.36	0.35 0.35	0.35 0.34	0.34 0.35	0.33 0.34
0.44 0.44	0.42 0.42	0.37 0.37	0.35 0.35	0.35 0.34	0.34 0.35
1.28 1.28	1.07 1.08	0.49 0.49	0.37 0.37	0.35 0.35	0.34 0.35
2.6 ^{C1} 2.8	2.6 ^{C2} 2.7	1.07 1.06	0.42 0.42	0.36 0.36	0.35 0.35
2.4 ^{C3} 3.8	2.5 ^{C4} 2.8	1.54 1.57	0.51 0.52	0.37 0.38	0.35 0.35
2.4 ^{C5} 2.5	2.5 ^{C6} 2.6	2.6 ^{C7} 2.6	1.06 1.08	0.41 0.41	0.36 0.36

FIGURA 12.- RELACION FLUJO RAPIDO A FLUJO TERMICO EN EL
EN EL CENTRO DE CADA "CAJA" (VER SECCION II.4)
EN EL CASO CON BARRAS TOTALMENTE EXTRAIDAS
(VALOR SUPERIOR) Y TOTALMENTE INSERTADAS (VA
LOR INFERIOR) EN UNIDADES DE 10^{14} N/CM² .SEC.

C1	C2	POTENCIA DEL CAJAL [$\frac{W}{T_c}$] RITMO DE QUEMADO [$\frac{W}{T_c}$]
.327 277.	.305 259.	
C3 (BARRA)	C4	
.363 390.	.355 301.	
C5	C6	C7
.437 371.	.388 329.	.326 276.

FIGURA 13.- POTENCIAS EXTRAIDAS Y RITMOS DE QUEMADO EN CADA CAJA DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES.

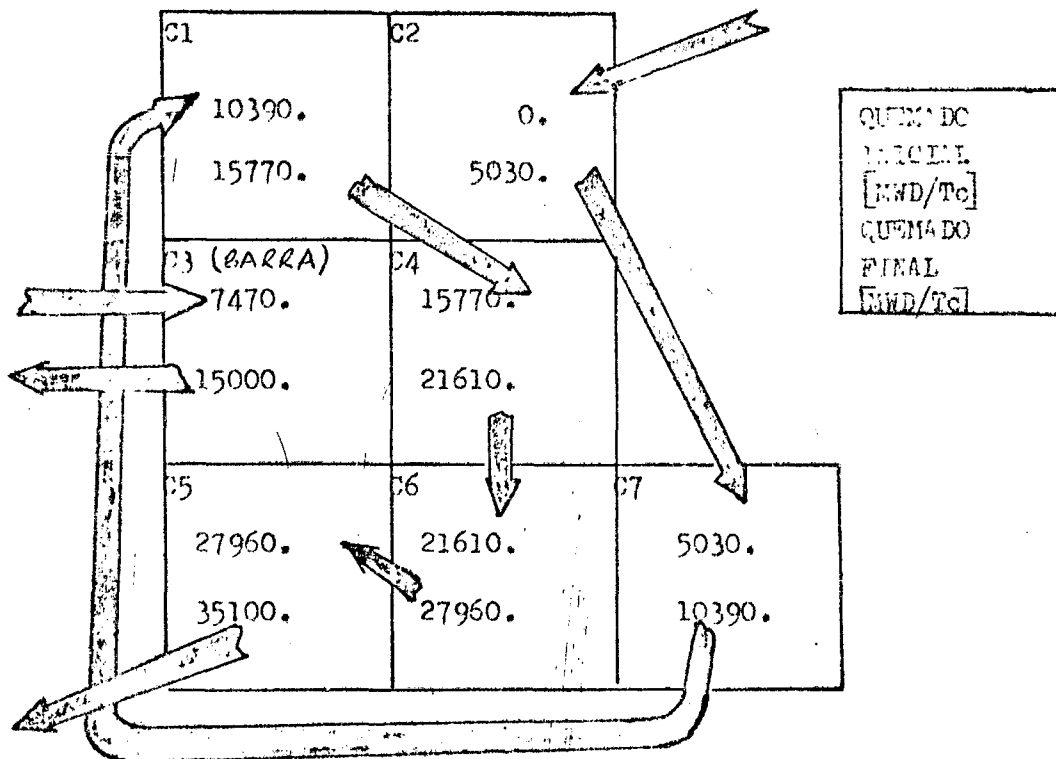


FIGURA 14.- QUEMADOS INICIALES Y FINALES EN UN CICLO EN CADA CAJA DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES.

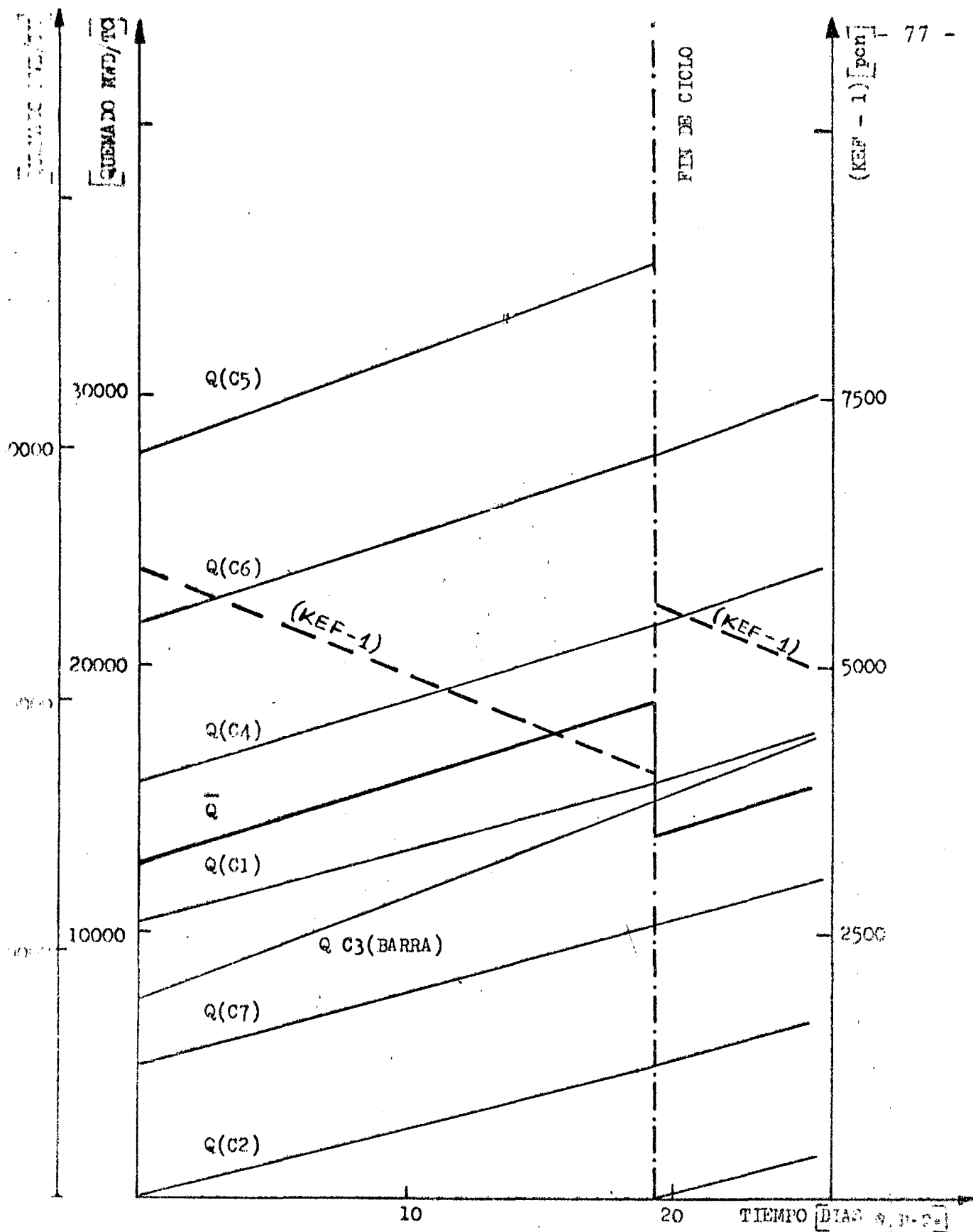


FIGURA 15.- EVOLUCION DE QUEMADOS POR CANAL, DEL QUEMADO MEDIO Y DE LA REACTIVIDAD EN UN CICLO ENTRE DOS RECAMBIOS DE E.C.

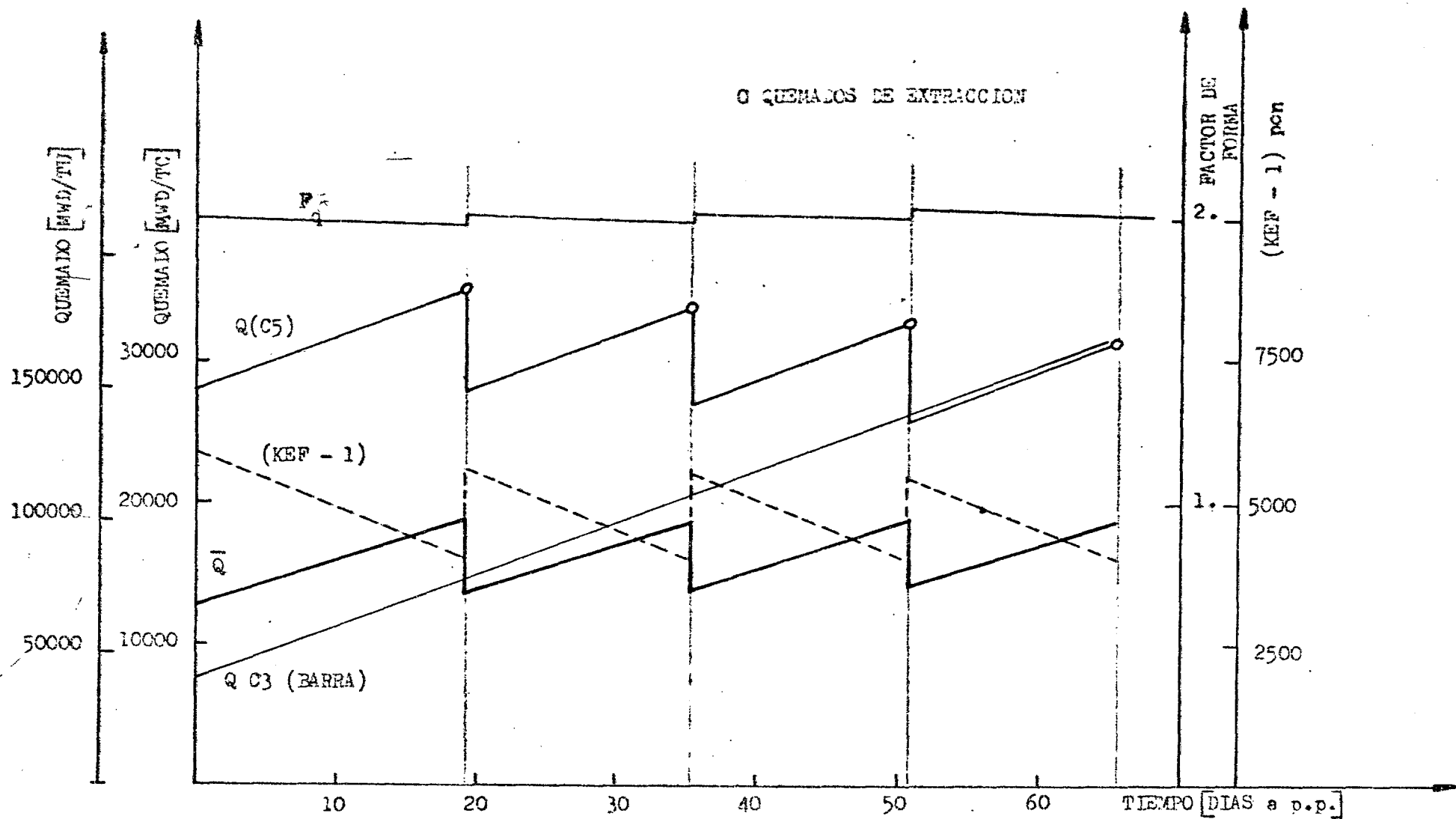


FIGURA 16.- EVOLUCION DE QUEMADOS, DE LA REACTIVIDAD Y EL FACTOR DE FORMA A TRAVES DE CUATRO CICLOS AL FINAL DE LOS CUALES SE RECAMBIAN LOS ELEMENTOS COMBUSTIBLES NORMALES PERO NO AQUELLOS QUE ALOJAN BARRAS.

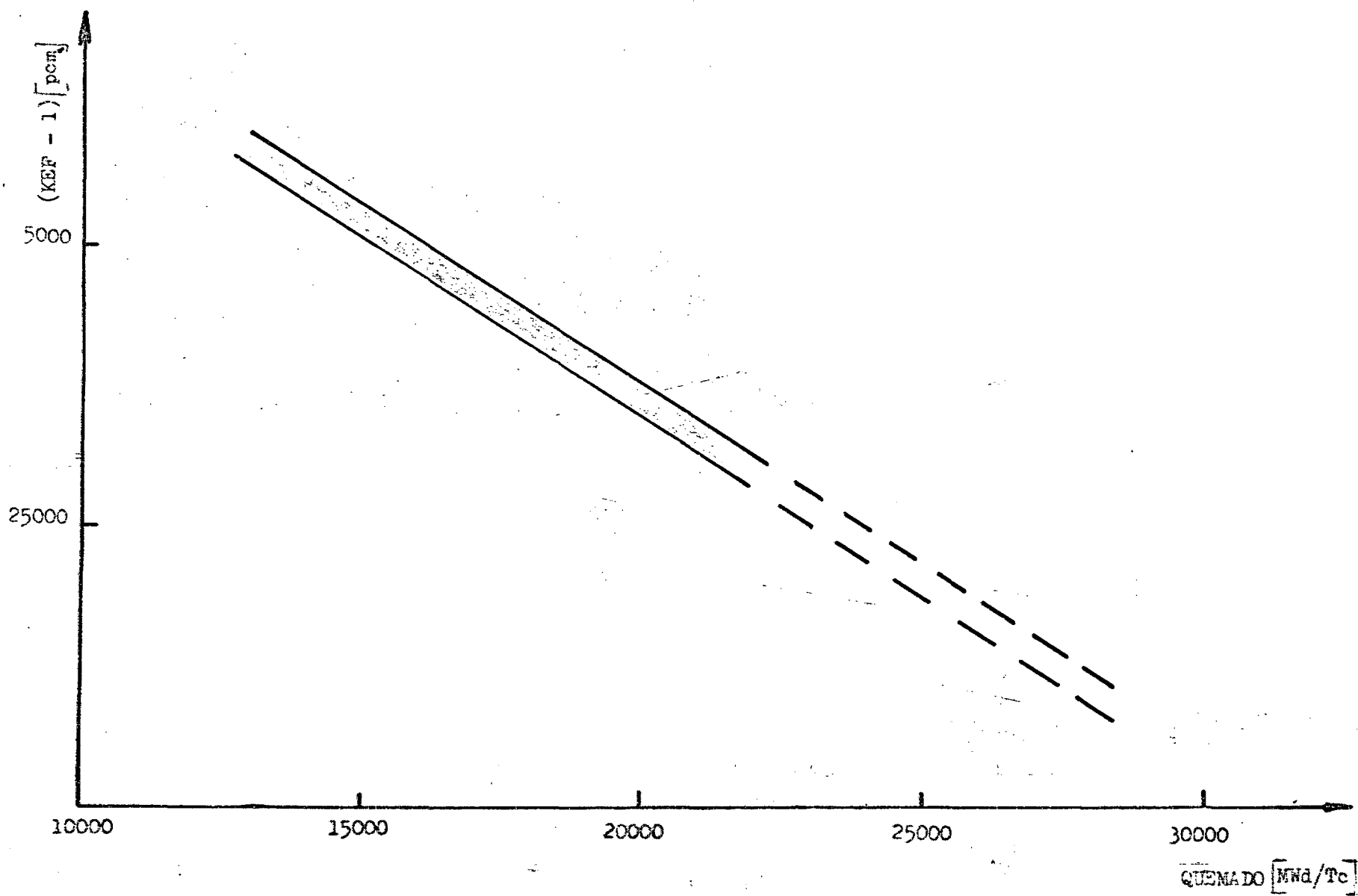


FIGURA 17.- REACTIVIDAD DE LA CONFIGURACION CONF-3 EN FUNCION DEL QUEMADO MEDIO.

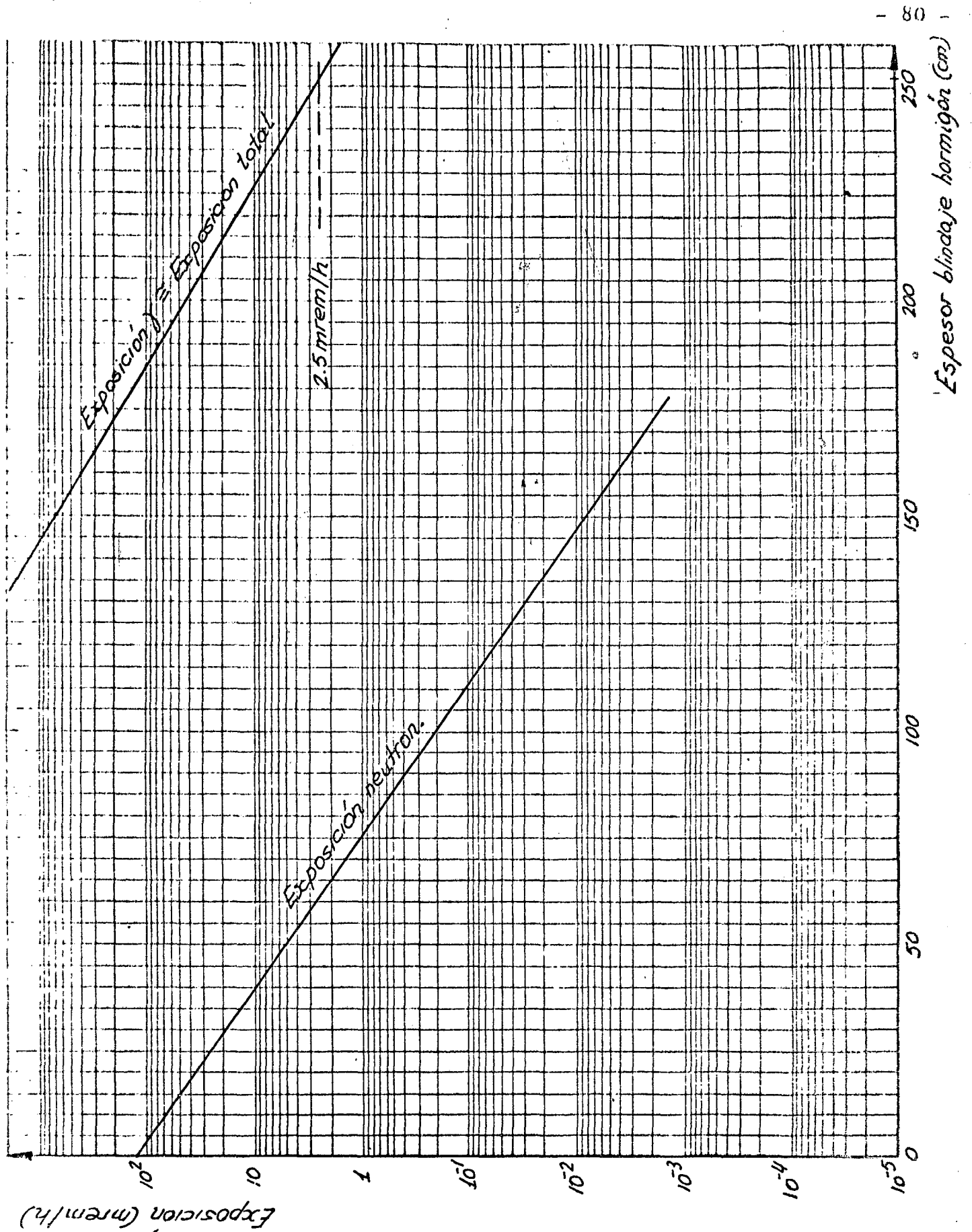


FIGURA 18 : Distribución de exposición en el blindaje radial del núcleo
(hormigón común)

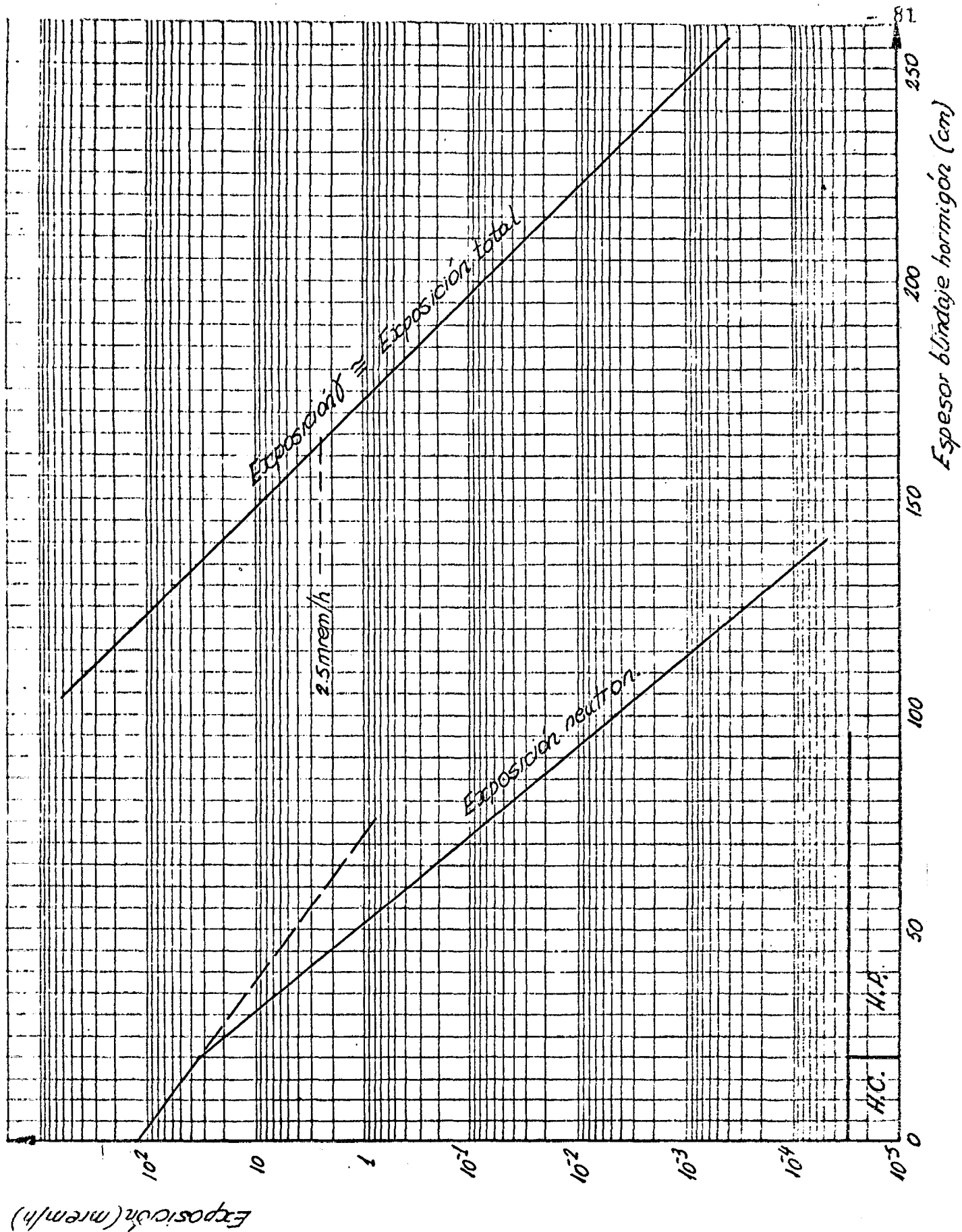


FIGURA 19: Distribución de exposición en el blindaje radial del núcleo
(hormigón común + hormigón pesado)

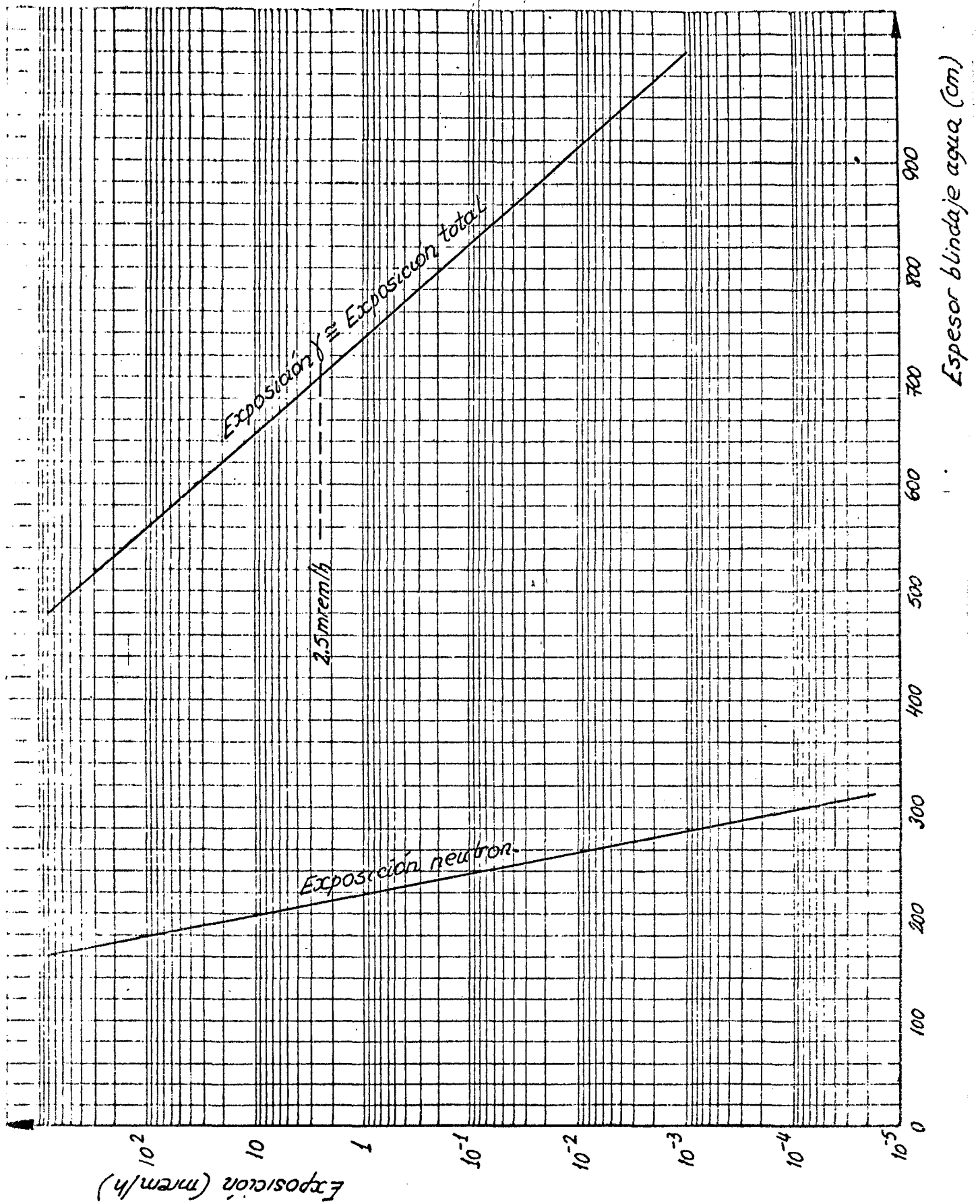


FIGURA 20: Distribución de exposición en el blindaje axial del núcleo

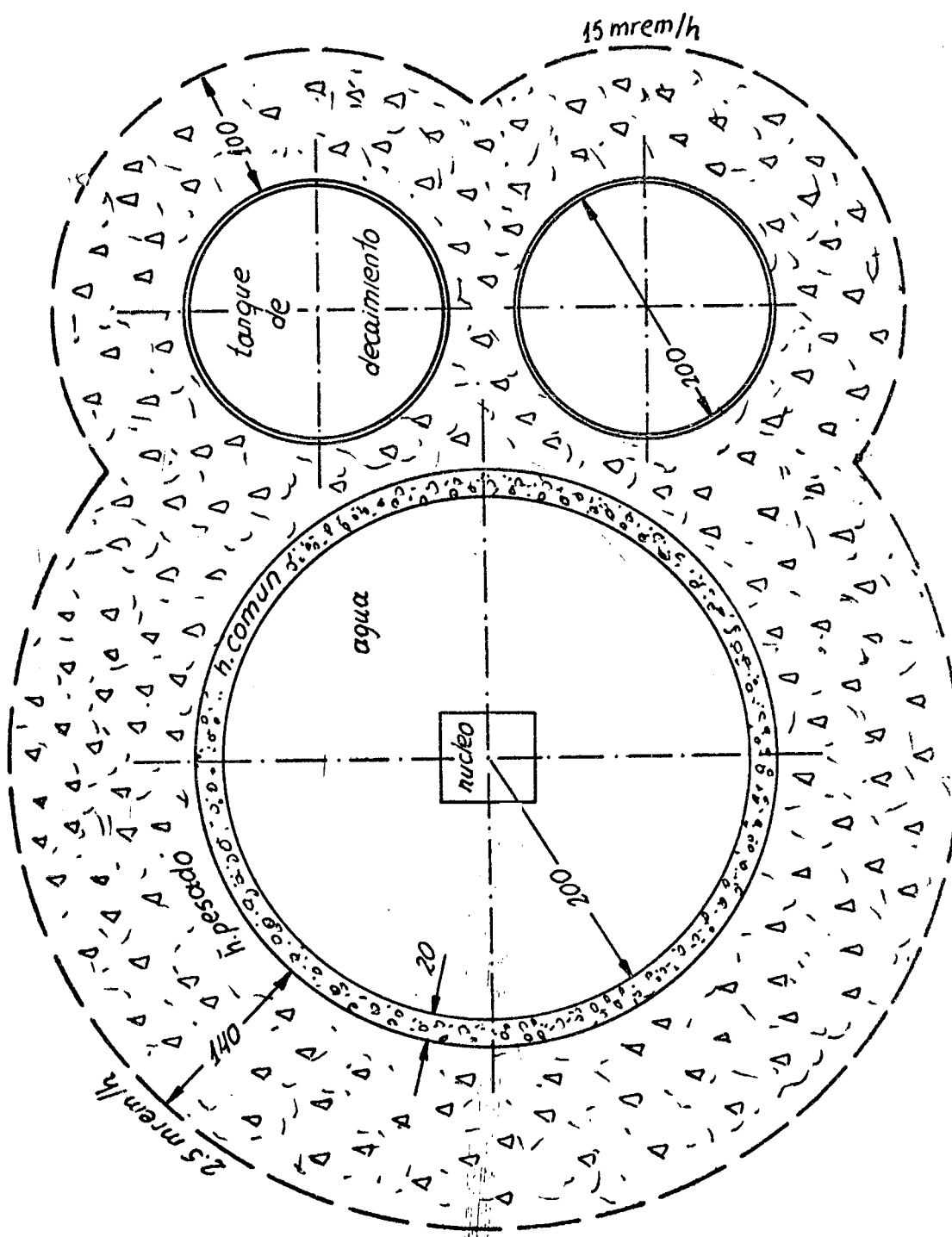


FIGURA 21: Blindajes de la configuración reactor-tanques de decaimiento (opción A) Planta.

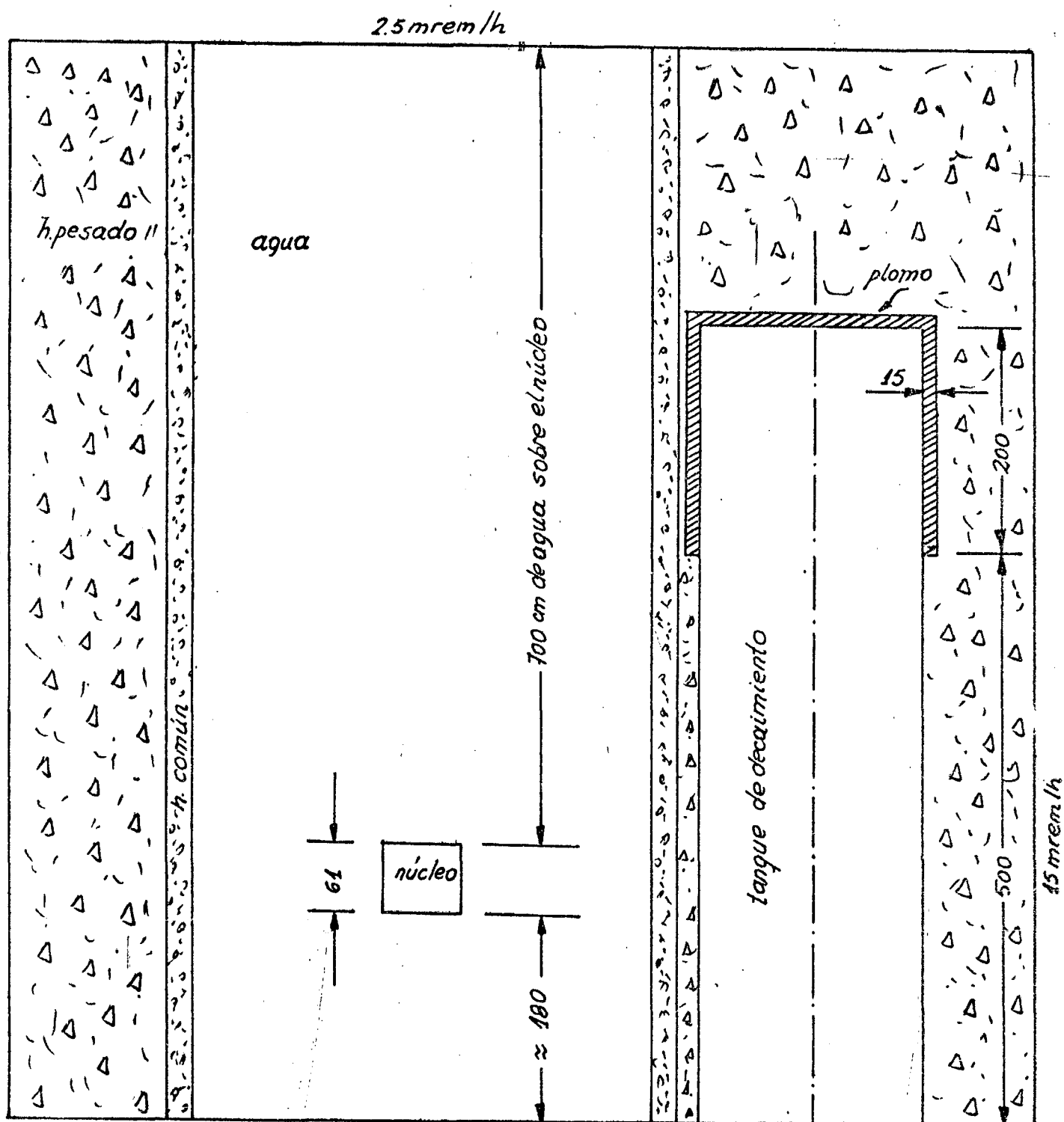


FIGURA 22: Blindajes de la configuración reactor-tanques de decaimiento (opción A) Corte.

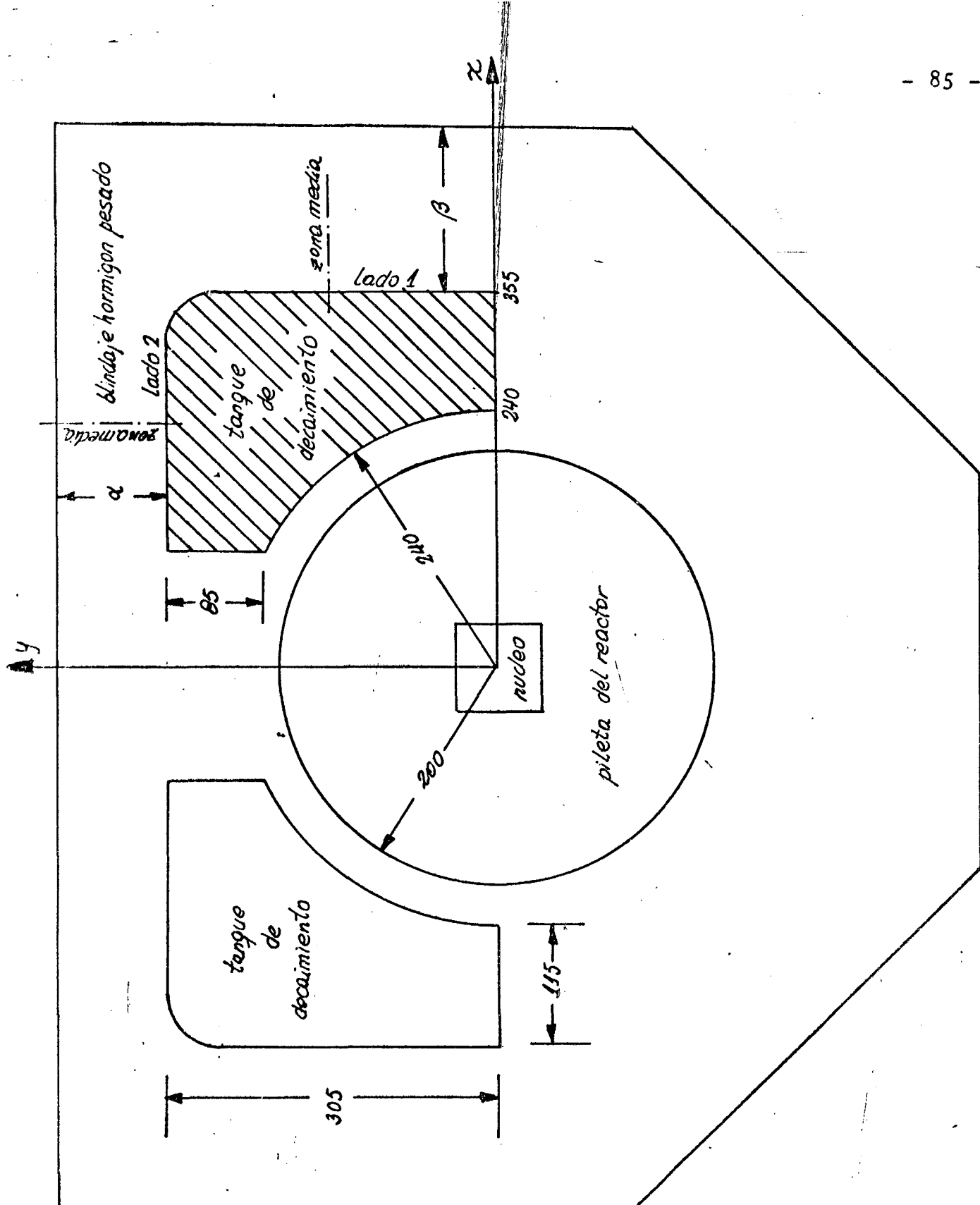


FIGURA 23: Blindajes de la configuración reactor-tanques de decaimiento (opción B) Planta.

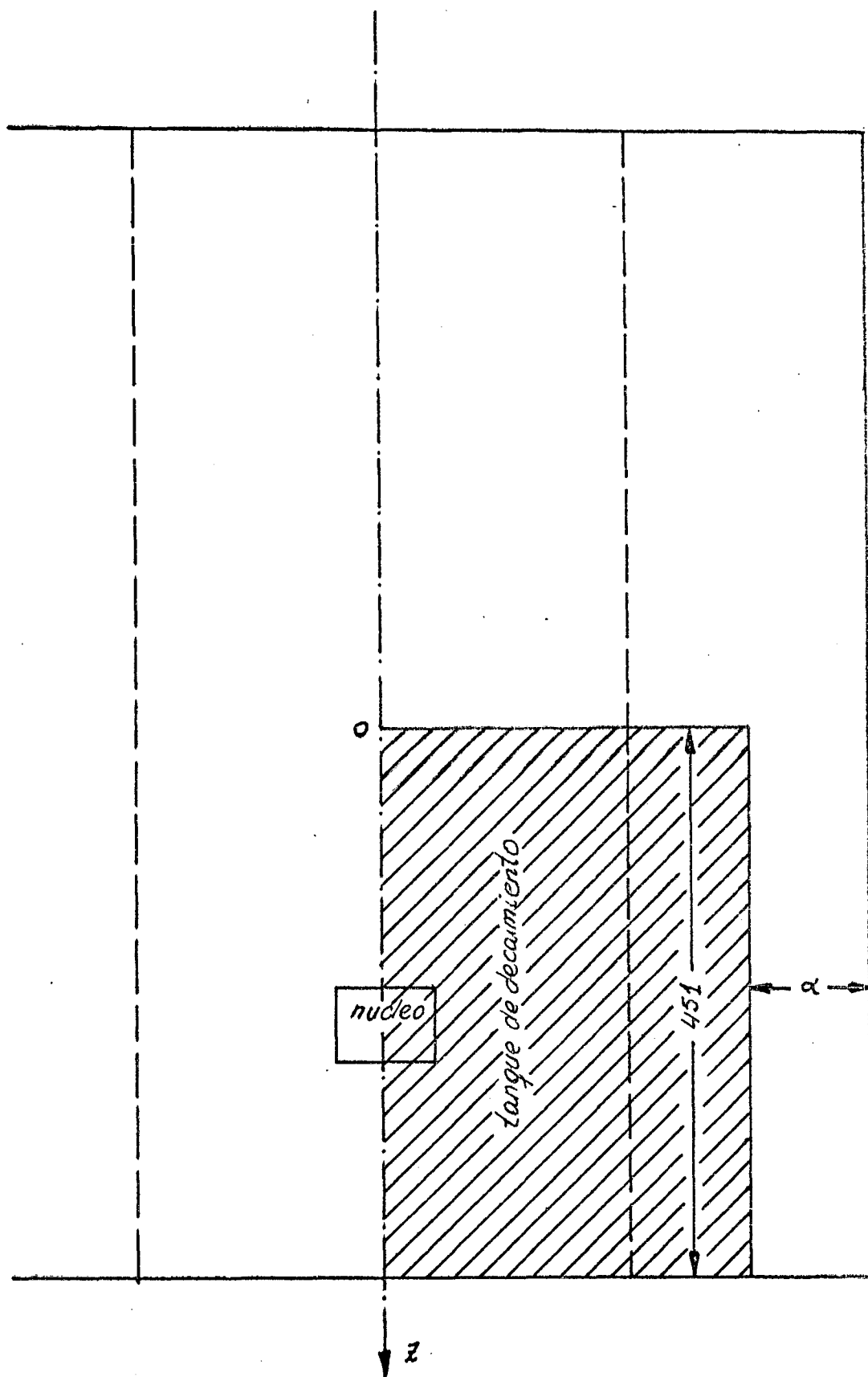


FIGURA 24: Blindajes de la configuración reactor-tanques de decaimiento (opción B) Corte.

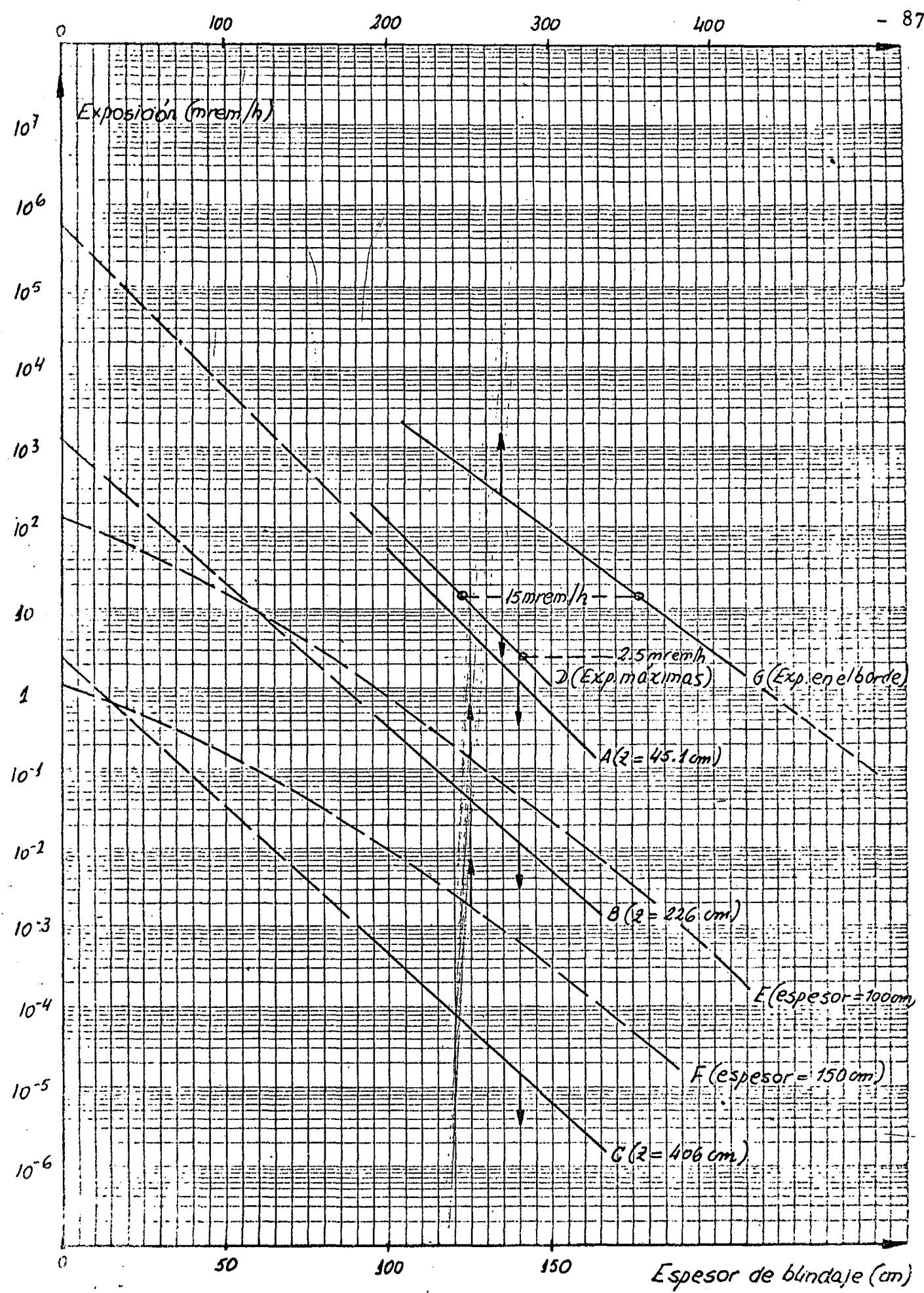


FIGURA 25: Distribuciones de exposición en el blindaje del tanque de decaimiento (opción B)