

|                       |             |
|-----------------------|-------------|
| C.N.E.A. Biblioteca   |             |
| ARCHIVO PUBLICACIONES |             |
| Nº<br>2               | Año<br>1974 |

0874. 14

CNEA-CN 5/145

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA  
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

Area Combustibles Nucleares

EXAMEN POST IRRADIACION DEL ELEMENTO DE COMBUSTIBLE  
NUCLEAR PROTOTIPO CNEA-MZFR-I

R.H. Rodríguez Pasqués, D.I. Vassallo, E.E. García,  
A. Castellá y E. Guillaume

Buenos Aires

1974

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen las informaciones facilitadas por profesionales y técnicos del Centro de Investigación Nuclear de Karlsruhe, particularmente los Ingenieros Scheeder y Enderlein, del Laboratorio de Celdas Calientes y el Dr. Ritz, del Reactor IZFR.

## RESUMEN

El elemento de combustible nuclear de potencia "Prototipo CNEA-MZFR-I", fabricado en sus partes esenciales por el Departamento de Combustibles Nucleares de la Comisión Nacional de Energía Atómica fue irradiado en el reactor alemán MZFR, y fue sometido, después de la irradiación, a numerosos exámenes físicos, químicos y metalúrgicos en la pileta depósito anexa a dicho reactor y en el Laboratorio de Celdas Calientes del Centro de Investigación Nuclear de Karlsruhe. Estos ensayos y análisis se realizaron con el objeto de conocer y evaluar el comportamiento del Prototipo y las alteraciones sufridas. En el presente informe se describen, explican y comentan esos ensayos y se agregan interpretaciones de algunos de los resultados.

- I N D I C E -

|                                                           |        |
|-----------------------------------------------------------|--------|
| 1. INTRODUCCION                                           | Pág. 1 |
| 2. FABRICACION DEL PROTOTIPO                              | 1      |
| 3. IRRADIACION EN EL REACTOR MZFR                         | 3      |
| 4. ENSAYOS EN PILETA-DEPOSITO                             | 4      |
| 5. 4.1. Introduccion                                      | 4      |
| 4.2. Observacion visual                                   | 7      |
| 4.3. Medicion de la longitud total del elemento           | 8      |
| 4.4. Medicion del alabeo                                  | 8      |
| 4.5. Medicion de distancia entre separadores              | 8      |
| 4.6. Conclusion                                           | 10     |
| 5. SELECCION DE ENSAYOS EN CELDA                          | 12     |
| 6. TRANSPORTE DEL PROTOTIPO E INTRODUCCION EN CELDAS      | 12     |
| 6.1. Transferencia a casco-blindaje y transporte          | 12     |
| 6.2. Introduccion del Prototipo en las celdas             | 14     |
| 7. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS                                | 16     |
| 7.1. Observacion visual y fotografica                     | 16     |
| 7.2. Separacion entre barras                              | 17     |
| 7.3. Desarmado del elemento                               | 18     |
| 7.4. Observacion detallada e identificacion de cada barra | 18     |
| 7.5. Observacion de separadores                           | 20     |
| 7.6. Envase y deposito                                    | 20     |
| 7.7. Medicion del diametro de las barras                  | 20     |
| 7.8. Medicion de la longitud de las barras                | 29     |
| 7.9. Radiografia                                          | 30     |
| 7.10. "Scanning" gamma                                    | 32     |
| 7.11. Espectrometria gamma                                | 39     |
| 7.11.1. Técnica. Resultados.                              | 39     |

|         |                                                                                       |         |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 7.11.2. | Aplicación de la espectrometría gamma a la<br>determinación de quemado relativo local | Pág. 39 |
| 7.11.3. | Discusión                                                                             | 46      |
| 8.      | ENSAYOS DESTRUCTIVOS                                                                  | 46      |
| 8.1.    | Determinación de gases de fisión                                                      | 46      |
| 8.2.    | Determinación de quemado relativo                                                     | 53      |
| 8.2.1.. | Técnicas. Resultados.                                                                 | 53      |
| 8.2.2.  | Distribución de quemado en el elemento combustible                                    | 60      |
| 8.2.3.  | Fuentes de quemado y producción de plutonio                                           | 62      |
| 8.3.    | Metalografía. Ceramografía.                                                           | 65      |
| 8.3.1.  | Interacción vaina-óxido                                                               | 66      |
| 8.3.2.  | Oxido de uranio                                                                       | 67      |
| 8.3.3.  | Zircaloy                                                                              | 72      |
| 8.4.    | Autorradiografías                                                                     | 75      |
| 9.      | BIBLIOGRAFIA                                                                          | 77      |

Figuras 34 a 54

páginas 78-79

## 1. INTRODUCCION

El experimento de irradiación del "elemento combustible" (EC) Prototipo I formó parte del conjunto de experimentos planeados dentro del programa de desarrollo de tecnología de fabricación de EC de potencia.

Los propósitos perseguidos en este caso fueron:

- a) Comprobar algunas de las etapas de desarrollo de "know-how" de fabricación para EC tipo PHWR, destinadas a la producción nacional de combustible para la Central Nuclear en Atucha.
- b) Ganar conocimiento y experiencia relativos a irradiación experimental de EC, y sus efectos.
- c) Entrenamiento en ensayos post-irradiación, sus técnicas e interpretación.
- d) Verificación, a través de los ensayos post irradiación, del comportamiento en uso del primer EC de potencia fabricado en sus partes esenciales en la República Argentina.

La realización del experimento fue posible merced a la vigencia del Convenio Argentino-Alemán de Cooperación Científica y Técnica, y a la amplia colaboración ofrecida, dentro del marco de ese convenio, por el Centro de Investigación Nuclear de Karlsruhe (Kernforschungszentrum Karlsruhe, KFK), República Federal Alemana.

Los objetivos c) y d) se cumplieron con la participación in situ de una comisión de profesionales de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) integrada por los autores del presente informe. Las operaciones del examen fueron realizadas por personal técnico del KFK.

Los resultados detallados de los ensayos post irradiación del EC Prototipo I en el Laboratorio de Celdas Calientes del KFK están contenidos en el Informe preparado por el personal profesional y técnico de ese laboratorio (1).

El presente informe amplía esos datos añadiendo los resultados de observación en piletas, etc., y además comenta los resultados de los ensayos, agregando explicaciones e interpretaciones sobre los mismos.

## 2. FABRICACION DEL PROTOTIPO

El EC Prototipo I fue fabricado de acuerdo con el diseño y especificaciones de la Compañía Siemens Aktiengesellschaft para elementos combustibles utilizados

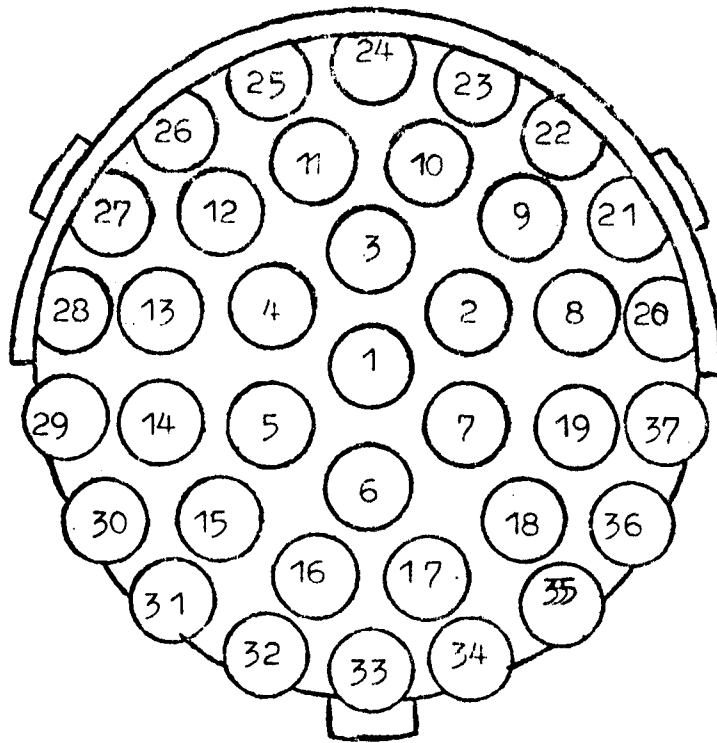


FIG. 1. Sección transversal del elemento prototipo CNEA-MZFR-1, visto desde su extremo superior. En la tabla se indica la posición de cada barra y su correspondiente número-designación.

| POSICION | Barra Número | POSICION | Barra Número |
|----------|--------------|----------|--------------|
| 1        | 6 T          | 20       | 29 T         |
| 2        | 1 T          | 21       | 21 T         |
| 3        | 2 T          | 22       | 26 T         |
| 4        | 3 T          | 23       | 24 T         |
| 5        | 4 T          | 24       | 28 T         |
| 6        | 5 T          | 25       | 23 T         |
| 7        | 7 T          | 26       | 25 T         |
| 8        | 9 T          | 27       | 20 T         |
| 9        | 8 T          | 28       | 27 T         |
| 10       | 19 T         | 29       | 35 T         |
| 11       | 10 T         | 30       | 36 T         |
| 12       | 11 T         | 31       | 34 T         |
| 13       | 12 T         | 32       | 37 T         |
| 14       | 38 T         | 33       | 22 T         |
| 15       | 14 T         | 34       | 30 T         |
| 16       | 18 T         | 35       | 33 T         |
| 17       | 15 T         | 36       | 31 T         |
| 18       | 16 T         | 37       | 32 T         |
| 19       | 17 T         |          |              |

en el reactor de potencia MZFR, del Centro Nuclear de Karlsruhe.

Dichos elementos son ensambles de "barras" constituidas por hileras de pastillas de bióxido de uranio natural contenidas en vainas de zircaloy-4.

Un EC tipo MZFR consta de treinta y siete barras, treinta y seis de las cuales van agrupadas alrededor de la barra central en series anulares concéntricas de 6, 12 y 18 barras respectivamente.

Las pastillas de bióxido de uranio natural ( $UO_2$ ) sinterizado fueron fabricadas en el Departamento de Combustibles Nucleares de la Gerencia de Tecnología de la CNEA, Centro Atómico Constituyentes.

Las vainas de las barras fueron fabricadas por la empresa SIAM Electromecánica S.A., empleando tubos de zircaloy-4 provistos por la firma Sandvik, de Suecia; estos tubos se llenaron con las pastillas de  $UO_2$  (148-152 pastillas, con masa total promedio de 1,5 kg de  $UO_2$  por barra). Los extremos de cada tubo fueron cerrados mediante tapones soldados por TIG (soldadura bajo atmósferas protectoras de argón y de helio para el primero y segundo tapón respectivamente).

El ensamblado de treinta y siete barras se realizó en la planta de la firma Reaktor Brennelement Gesellschaft (RBG), en Wolfgang-bei-Hanau, Alemania Federal, bajo inspección del Ing.C. Biondo, del Departamento de Combustibles Nucleares de la CNEA. Las piezas estructurales (separadores, placas terminales, etc.) fueron provistas por RBG.

Los detalles de los procedimientos usados durante todas las etapas de fabricación y los análisis y ensayos de especificaciones están descriptos en el Protocolo de Fabricación (2).

En la Figura 1 se representa un corte transversal del Prototipo CNEA-MZFR-I.

### 3. IRRADIACION EN EL REACTOR MZFR

El Reactor de Investigación de Múltiple Propósito (Mehrzweckforschung Reaktor, MZFR) se encuentra ubicado en el Centro de Investigación Nuclear de Karlsruhe. Se trata de un pequeño reactor de potencia de 200 MW térmicos y 50 MW eléctricos netos, de tipo PHWR, cuyo diseño general es similar al de la Central Nuclear en Atucha.

La presión interior del reactor se mantiene a 90 atmósferas. El "caudal" de refrigerante es de 4650 toneladas por hora. El flujo promedio de neutrones térmicos es de  $1,17 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ seg}^{-1}$ , y la potencia lineal media de una barra de combustible alcanza a 116 vatios/cm.

Los EC se ubican en el núcleo del reactor en posiciones codificadas alfanuméricamente. Aquellas posiciones de flujo nominal semejante se designan, además, con un número común. Ver Fig.2.

El 4 de enero de 1971 el EC Prototipo CNEA-MZFR-I fue introducido en la ubicación J4 (una de las posiciones "8", en que el flujo permite lograr un quemado relativo de hasta 2000 MWd/ton), arriba del plano medio del núcleo, es decir, como EC superior dentro del canal respectivo; allí permaneció hasta el 22 de abril de 1971 hasta alcanzar un quemado calculado en 2000 MWd/ton. Ese día el prototipo fue sacado y transferido a la pileta-depósito, donde fue sometido a algunos exámenes subacuáticos (ver sección 4).

Enseguida el Prototipo fue reintroducido en el núcleo, en la ubicación F7 (una de las posiciones "2" de alto flujo), también por encima del plano medio, y allí permaneció hasta su retiro definitivo el 31 de agosto de 1971. La orientación del EC relativa al eje central vertical del reactor fue la misma durante ambos ciclos de irradiación; es decir, que al entrar en el núcleo por segunda vez no fue invertido ni rotado en ningún valor de ángulo con respecto a su orientación durante el primer ciclo.

Al terminar la segunda exposición, y alcanzar un quemado total calculado en 5440 MWd/ton el Prototipo fue extraído del reactor cerca de la fecha de parada ("shut-down") anual y se lo transfirió a la pileta-depósito anexa, donde se realizó un segundo examen subacuático (1/9/71).

La Fig.3 presenta un esquema de la permanencia de EC especiales con combustible enriquecido, cerca del Prototipo I. En la Fig. 4 se representa la historia de los ciclos de potencia a que estuvo sometido el reactor durante el período de irradiación del elemento argentino.

Finalmente, corresponde señalar que en base a los datos sobre quemado relativo del Prototipo I se puede calcular que el mismo suministró a la central alemana durante su permanencia en el reactor:  $7,26 \times 10^6$  kWh de energía térmica, es decir  $1,82 \times 10^6$  kWh de energía eléctrica neta

#### 4. ENSAYOS EN LA PILETA-DEPOSITO

##### 4.1. Introducción

El examen en pileta tiene los siguientes objetivos:

- 1) Observación visual
- 2) Medición de longitud total del elemento
- 3) Medición del alabeo del elemento
- 4) Medición de la distancia entre separadores

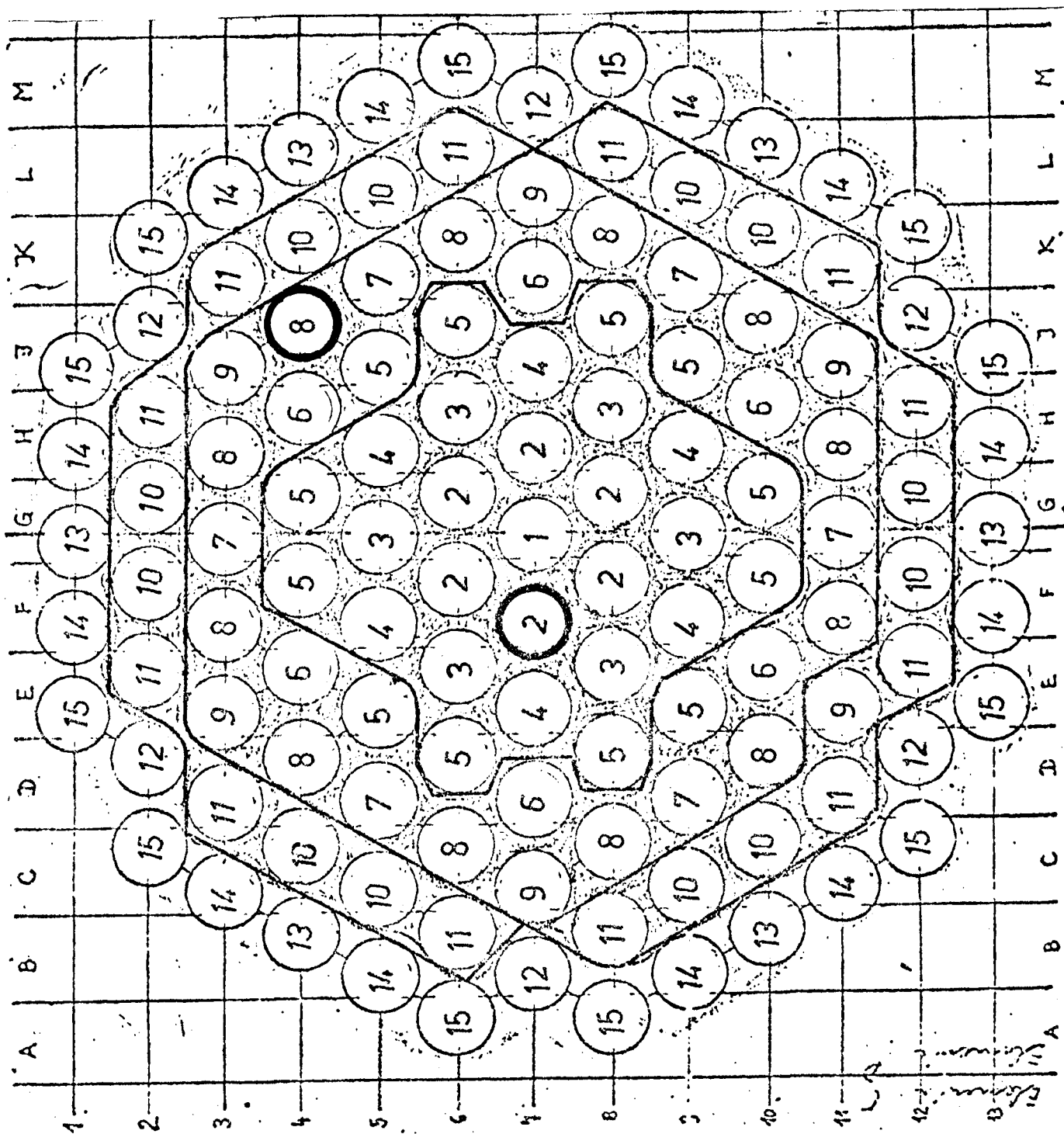
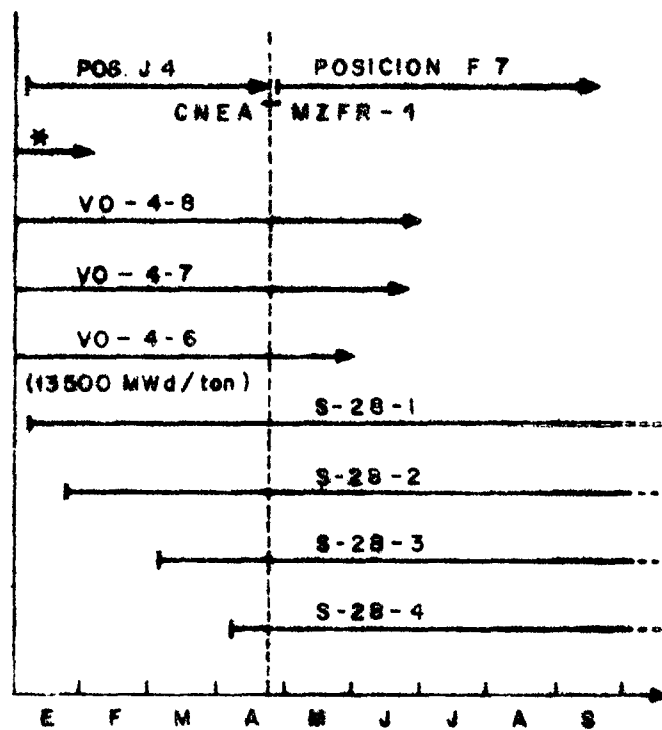


Fig. 2. - Posiciones en el núcleo del reactor MZFR. Se han indicado especialmente las ocupadas sucesivamente por el Prototipo I.



\* Elemento de 16 barras  
 Elementos VO-4 : 1,1 % de  $^{235}\text{U}$   
 Elementos S-28 : 0,9 % de  $^{235}\text{U}$

Figura 3

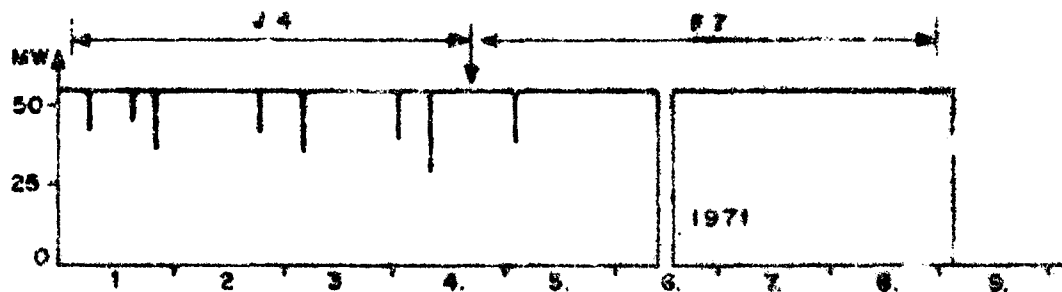


Fig. 4. - Diagrama de ciclos de potencia en el reactor MZFR durante la irradiación del Prototipo I.

Para todos los ensayos mencionados más arriba la pileta del reactor posee una máquina especialmente concebida a tal efecto. En dicha máquina el elemento está ubicado en posición vertical y mediante dos dispositivos de la misma se lo puede hacer rotar.

El instrumento para la observación visual es un periscopio telescópico cuya óptica está constituida por un telescopio tipo "Questar".

#### 4.2. Observación visual

El periscopio tiene un desplazamiento vertical algo mayor que la longitud total del elemento combustible lo cual permite ver bien desde la placa terminal inferior hasta la superior. Bajo el agua la rotación del ángulo de visión en  $90^\circ$  se hace mediante un espejo. Dicho espejo está hecho de un cristal especial para no sufrir alteraciones cuando es expuesto a niveles altos de radiación. El telescopio Questar tiene corrección de acromatismo, lo cual permite hacer tomas fotográficas con película en color.

En la observación visual pudo verse aproximadamente  $270^\circ$  de la superficie de las barras del anillo exterior (referirse a esquema Fig.5).

El aspecto ofrecido por el Prototipo a la observación visual el 1° de abril de 1972 era normal y uniforme, presentando toda la superficie (barras, separadores, placas terminales) una coloración rojo pardusca debida a un depósito superficial de sarro ("crud") de óxidos metálicos hidratados. Ninguna de las barras exteriores evidenciaba a simple vista estar suelta respecto a las placas terminales ni presentaba en forma ostensible hinchazón ni hundimientos de la vaina.

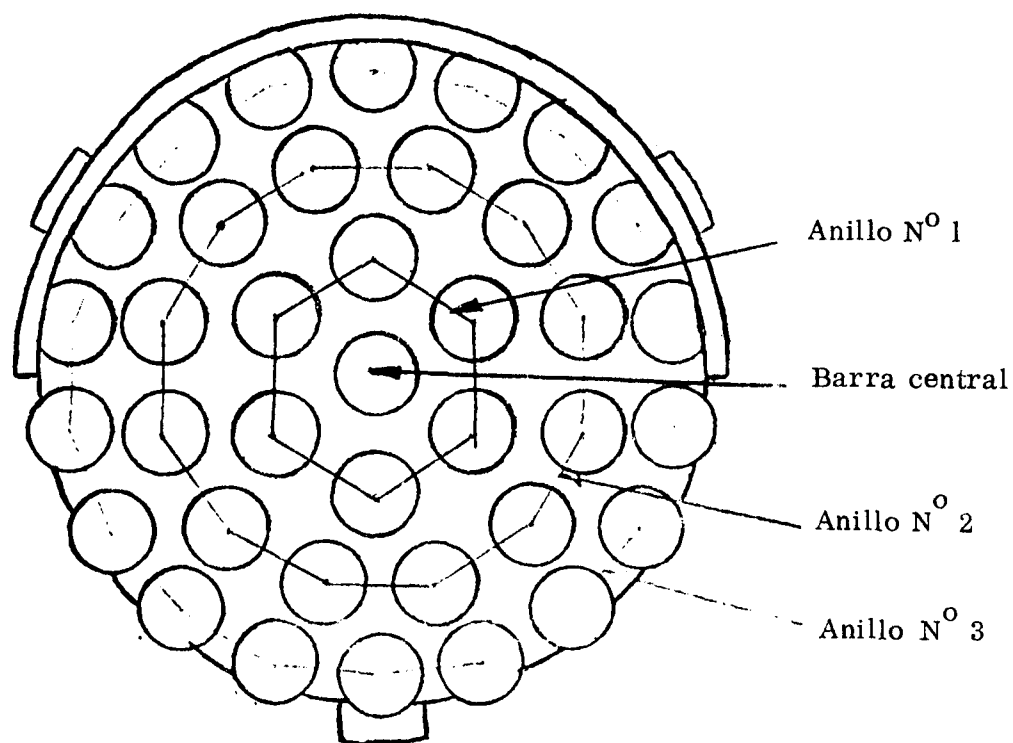


FIG. 5. Elemento prototipo CNEA-MZFR-1. Agrupación de las barras en anillos.

Ni las placas terminales ni los separadores denotaban signos visibles de distorsión, grietas o daños superficiales de otra especie.

#### 4.3. Medición de la longitud total del elemento

El dispositivo para la observación Fig.6 tiene en su parte superior un par de comparadores centesimales montados sobre un puente basculante y encerrados en una caja estanca. Los palpadores de estos comparadores se posan: uno directamente sobre la placa terminal superior y el otro, mediante un sistema de transmisión de movimiento, sobre la placa terminal inferior. Ambos comparadores tienen el cero tarado en la longitud del elemento pre-irradiación.

Una vez colocado el elemento en la máquina y la caja de comparadores en su posición de trabajo se lee directamente cuánto más largo o más corto es el elemento respecto a la medición pre-irradiación. La rotación del elemento permite en cierto modo la medición de la perpendicularidad de las placas terminales respecto al manajo de barras pues como se dijo los palpadores de los respectivos comparadores sondean el borde de las placas terminales. Realizada esta medición arrojó como resultado que la longitud total del elemento estaba incrementada en 1,48 mm y que la oblicuidad de las placas terminales respecto al manajo de barras era  $\pm 0,05$  mm.

#### 4.4. Medición del alabeo

Se efectúa mediante la ayuda de la placa semi-cilíndrica que es solidaria respectivamente con las placas superior e inferior. La máquina de mediciones tiene un dispositivo para realizar estas mediciones, que consiste en lo siguiente (Ver Fig.7).

En la parte inferior y donde se apoya el elemento combustible, existe un sistema que traba la rotación del combustible en una posición fija y que en todos los casos es la misma. En la parte superior y exteriormente al combustible existe una lámina semicilíndrica con graduaciones y cero central. Una vez colocado y trabado el combustible en la posición de lectura se proyecta el borde vertical de otra lámina semicilíndrica solidaria con la placa superior, sobre la escala exterior graduada. Se lee así cuántas divisiones en más o en menos está alabeado el combustible. Cada división equivale a torsión en  $1^\circ$ . En el caso que se ilustra, la lectura daría como resultado aproximado  $+ 0,5^\circ$ .

#### 4.5. Medición de distancia entre separadores

La máquina de mediciones tiene adosada en su parte exterior una regla graduada sobre la cual se puede proyectar visualmente la ubicación de los separa-

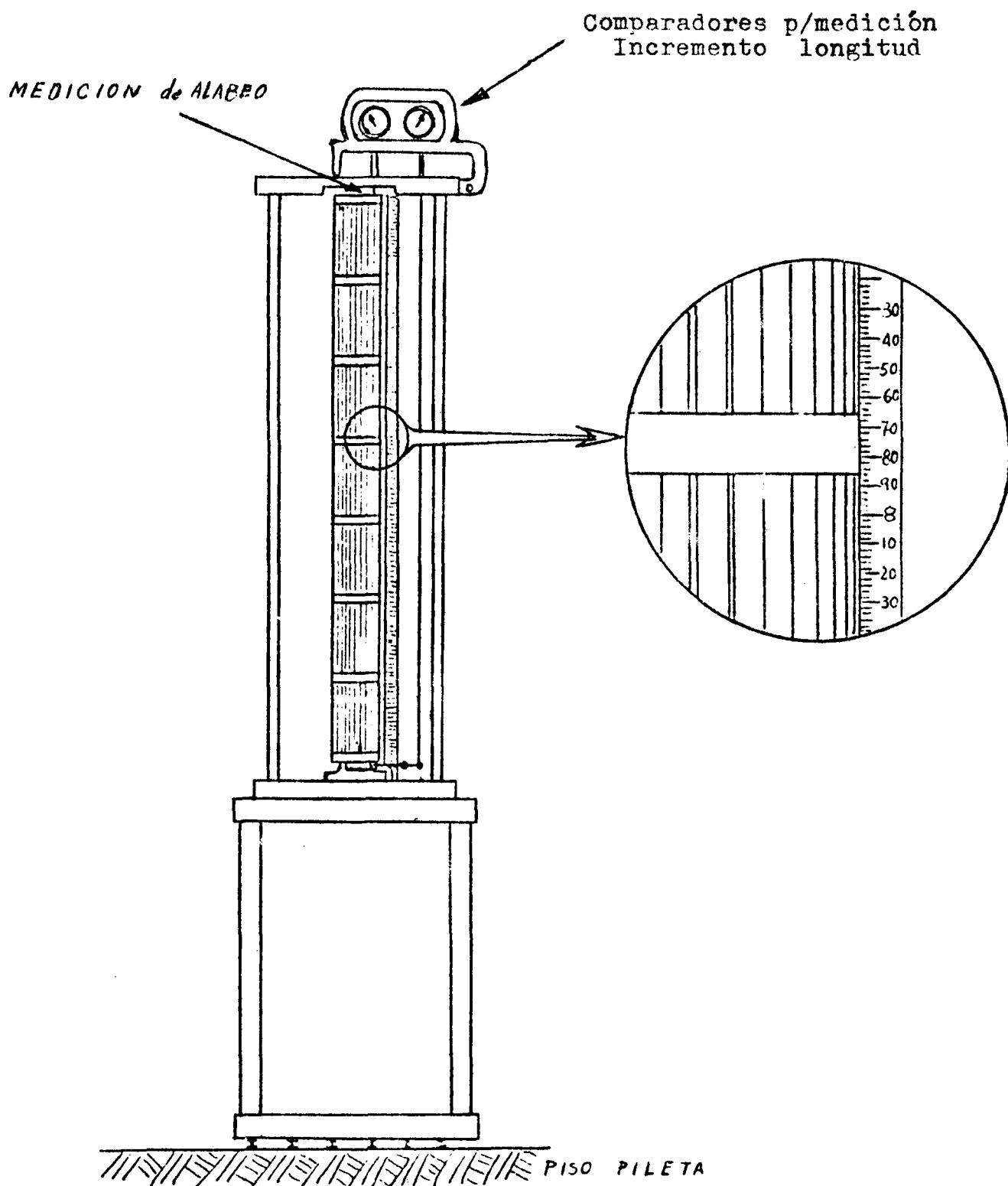


Fig. 6. - Sistema para inspección visual de elementos combustibles en la pileta del reactor MZFR (esquemático).

res. Gracias a ella y como en los casos anteriores con la ayuda del periscopio se puede determinar la distancia entre los separadores. Ver Fig. 6 b.

En oportunidad del último examen subacuático se obtuvieron los valores que figuran en la Tabla 1.

|                  |         | Distancias<br>intermedias |
|------------------|---------|---------------------------|
| Extremo superior | 000 mm  |                           |
|                  |         | 237 mm                    |
| Separador N° 1   | 237 mm  |                           |
|                  |         | 266 mm                    |
| Separador N° 2   | 503 mm  |                           |
|                  |         | 264 mm                    |
| Separador N° 3   | 767 mm  |                           |
|                  |         | 268 mm                    |
| Separador N° 4   | 1035 mm |                           |
|                  |         | 263 mm                    |
| Separador N° 5   | 1298 mm |                           |
|                  |         | 264 mm                    |
| Separador N° 6   | 1562 mm |                           |

TABLA 1

#### 4.6. Conclusion

Puede decirse que los exámenes dieron resultados completamente normales para elementos MZFR con el quemado alcanzado en el presente caso.

La opinión del personal técnico del reactor MZFR era que el elemento se veía en perfectas condiciones y que no denotaba haber sufrido daño alguno. Con respecto a la medición de longitud, se manifestó que en operaciones de rutina se encuentran aumentos de hasta 2,5 mm. El alabeo del Prototipo resultó ser de 1°, y se sabe que elementos con alabeo de hasta  $\pm 5^\circ$  no han dado lugar en el MZFR a ningún problema de operación.

En la Tabla 2 se reúnen los datos numéricos obtenidos en los dos ensayos subacuáticos ya mencionados, y además en otros dos ensayos similares realizados justo antes de la primera introducción en el reactor y el 1°/4/72, poco antes de retirarlo definitivamente de la pileta-depósito. Se consideró innecesario realizar ensayo de estanqueidad porque el sistema detector de fallas del reactor no acusó pérdidas de productos de fisión en ningún momento durante la irradiación.

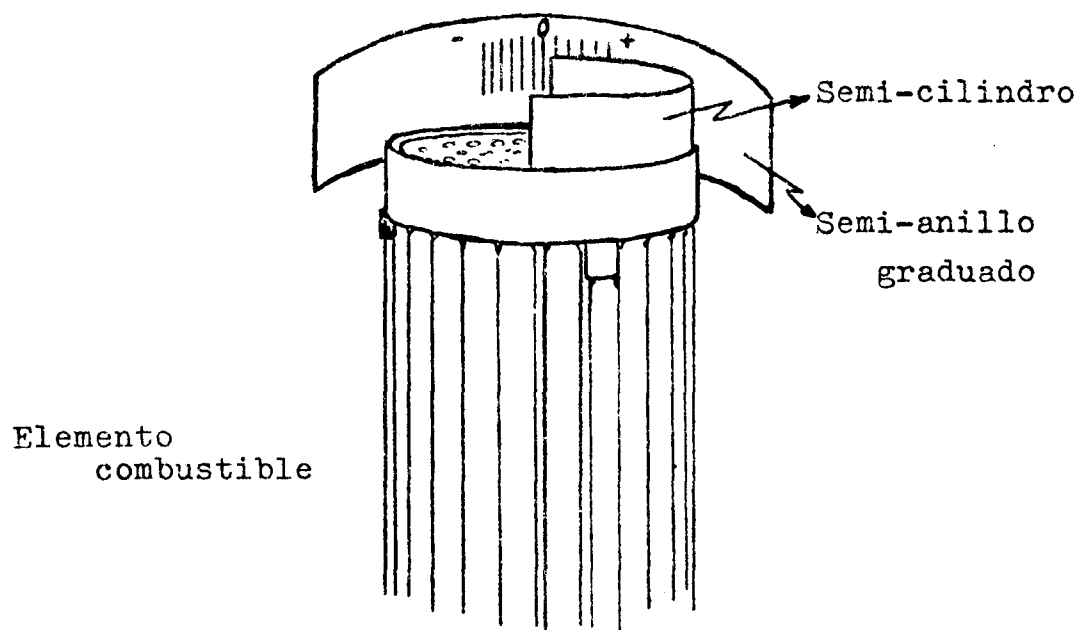


Fig. 7. - Dispositivo para medición de alabeo.

|                            | Examen<br>previo | 1er.<br>Examen | 2do.<br>Examen | 3er.<br>Examen |
|----------------------------|------------------|----------------|----------------|----------------|
| Fecha                      | 4/1/71           | 22/4/71        | 1/9/71         | 1/4/72         |
| Quemado relativo (MWd/ton) | 0                | 2000           | 5440           | 5440           |
| Longitud (mm)              | 1863,7           | 1864,4         | 1865,1         | 1865,2         |
| Alargamiento (mm)          | 0                | +0,7           | +1,4           | +1,5           |
| Alabeo (grados)            | -1               | 0              | 0              | 0              |

TABLA 2

## 5. SELECCION DE ENSAYOS EN CELDA

Teniendo en cuenta los objetivos del Prototipo (ver sección 1) y la oferta de colaboración del KFK y disponibilidades del Laboratorio de Celdas Calientes, se determinó que los exámenes post irradiación del Prototipo se llevarían a cabo sobre un sector formado por las barras 2 T, 10 T, 19 T, 23 T, 24 T y 28 T, el cual enfrentaba durante la irradiación en el MZFR al eje central del núcleo del reactor (ver Figs. 1 y 8).

Los exámenes se planearon con el objeto de comprobar la magnitud de cambios físicos y químicos sufridos por el Prototipo por efecto de la irradiación, de manera que los resultados permitan por un lado evaluar su comportamiento, y por otro sirvan de término de comparación para futuros experimentos de tipo similar.

Se acordó que una vez desarmado el elemento los ensayos se distribuirían así:

- a) Longitud: sobre las treinta y siete barras.
- b) diámetro a 58 mm. del cordón de soldadura: sobre las treinta y siete barras.
- c) diámetro y ovalización sobre longitud completa: barras "estructurales" 20 T, 21 T y 22 T.
- d) radiografía: sobre una barra del sector seleccionado; en la práctica se realizaron varias (ver sección 7.9).
- e) "scanning gamma" (medición longitudinal de actividad gamma): dos series sobre las seis barras del sector (una serie sobre radiación de 662 KeV y otra sobre banda comprendida entre 400 y 1700 keV de energía).
- f) determinación analítica de gases de fisión (criptón y xenón) libres y atrapados: sobre barras 2 T, 10 T y 23 T.
- g) determinación radioquímica de quemado relativo: sobre las seis barras del sector elegido.
- h) ceramografía sobre las barras 23 T y 28 T; metalografía sobre 2 T, 10 T, 19 T, 23 T, 24 T y 28 T.

Aparte de los ensayos convenidos se efectuaron también autorradiografías.

## 6. TRANSPORTE DEL PROTOTIPO E INTRODUCCION EN CELDAS

### 6.1. Transferencia a casco-blindaje y transporte

Esta operación fue realizada el 5/4/72. La primera parte consistió en trans

## VISTA ESQUEMATICA SUPERIOR

Centro geométrico del reactor

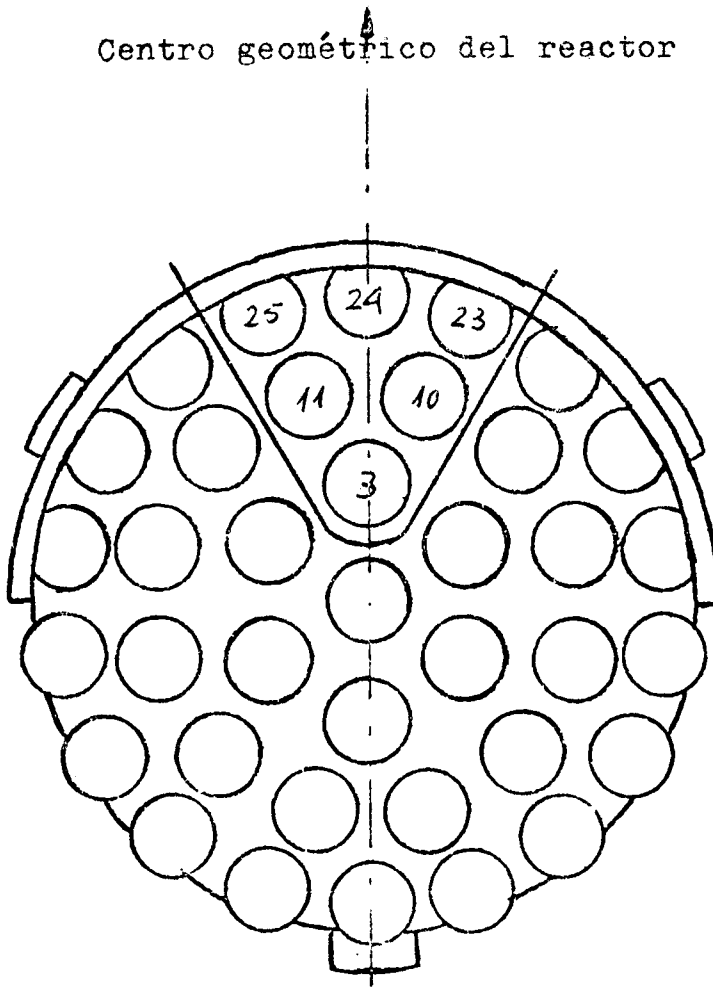


Fig. 8. - Sector de barras sobre las cuales se realizó "scanning" gamma, etc.

ferir el EC de la piletta al casco-blindaje, introduciéndolo primero en una vaina cilíndrica de acero inoxidable.

Al hacerse presentes los miembros de la misión QNEA, hallábase ya el casco-blindaje de plomo forrado en acero (peso aproximado 14 toneladas) suspendido del puente grúa, en posición vertical, con esclusa abierta a unos 10 cm. por encima de la superficie del agua.

Las personas presentes fueron ubicadas en lugares protegidos, de modo de no quedar expuestas a radiación directa durante la transferencia, ya que en esa ocasión el elemento combustible permanece momentánea y parcialmente sin blindaje alguno. Una vez todo en orden se procedió a la operación izando el prototipo en forma rápida y segura. Cuando el elemento estuvo dentro del recipiente blindado, transportóse el conjunto, tras algunas operaciones complementarias, a la zona

donde se halla la esclusa en el piso, donde el operario secó con papeles absorbentes el extremo inferior del recipiente, ya que se había detectado una pérdida en la estanqueidad del mismo. Por último se llevaron a cabo las operaciones finales de cierre del recipiente y se pasó éste a través de la esclusa en el piso a los pisos inferiores. La operación fue interrumpida en este paso.

El 6 de abril de 1972 fue transportado el recipiente blindado con el elemento combustible Prototipo desde el edificio de piletas hasta la esclusa de entrada de las celdas calientes (edificio B 701). Se trata de un trayecto de unos 500 metros. Este transporte se efectuó con el auxilio de un carro de 16 ruedas de goma maciza, el cual cuenta con su propio circuito de frenos. Este carro o zorra de transporte no posee movilidad propia; fue por lo tanto empujado por un pequeño camión frontal, lográndose la dirección del carro a través de la barra de empuje.

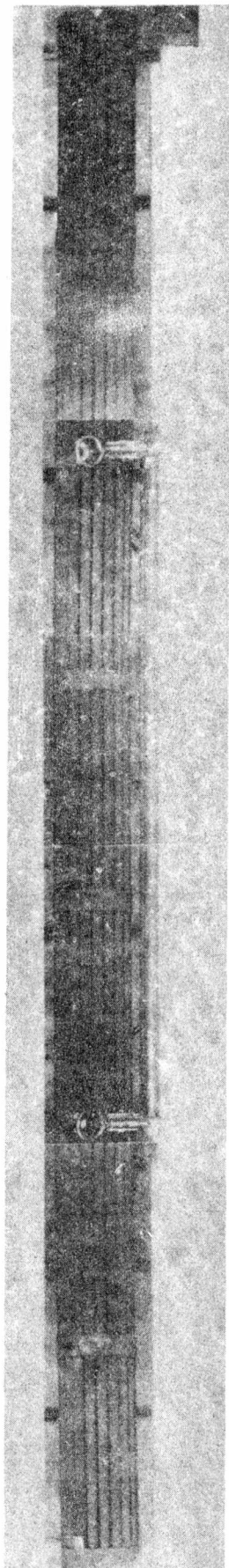
Se pudo observar nuevamente pérdida de estanqueidad del recipiente. Para tratar de impedir la salida de agua, probablemente contaminada, se había recubierto la boca del recipiente con papeles absorbentes, cubiertos a su vez con hojas de plástico sujetas con bandas autoadhesivas. A pesar de todas estas precauciones, el personal de seguridad detectó una leve contaminación en el piso de la esclusa, donde permaneció el recipiente hasta el día siguiente.

## 6.2. Introducción del Prototipo en las celdas

El recipiente blindado fue colocado en la zorra de aproximación de la esclusa con ayuda del puente grúa perteneciente al "hall técnico" de las celdas. Este vehículo de aproximación se compone de dos plataformas con ruedas de acero, las cuales se deslizan sobre rieles desmontables. Sobre estas dos plataformas se apoya la estructura que cumple la función de soportar el recipiente blindado; es en dicha estructura donde se encuentran los registros de ajuste vertical y transversal para el centrado del recipiente con la boca de la esclusa giratoria de recepción que existe al comienzo de la línea de celdas.

Antes de llevar a cabo la transferencia propiamente dicha fueron colocados en el piso hojas de plástico como prevención ante una probable contaminación durante la operación.

Luego fue abierta la esclusa en la pared ya mencionada, y operando desde afuera, donde un técnico empujó mediante una larga barra que entraba en el casco, y simultáneamente desde adentro de la celda, donde mediante los manipuladores se efectuó tracción hacia el interior, se transfirió el elemento combustible al interior de la celda. Esta es la fase crítica de toda la operación que exige mayores precauciones. Se cerró la esclusa giratoria de las celdas y la del recipiente blindado, se retiró este último de la pared y se tomaron muestras de superficie en el piso y paredes, próximos al lugar de la transferencia, lo que arrojó resultados negativos.



35a - Atucha BE 1-0-0-0/1-6

Imagen fotográfica compuesta del Prototipo 1 dentro de la celda caliente.

## 7. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

### 7.1. Observación visual y fotográfica

Una vez introducido en la celda N° 1, el EC fue sacado de la vaina cilíndrica en que se encontraba y fue acostado sobre una "cama", apoyado sobre los separadores 2 y 5, que distan entre sí 795 mm (Fig 9). El dispositivo está constituido por dos soportes de apoyo en forma de U unidos, pero a distancia regulable, sobre un par de barras horizontales paralelas.

La cama puede colgarse del puente grúa mediante cables de acero, lo cual permite trasladar fácilmente al EC de un lugar a otro.

La observación se realizó directamente a través de la ventana de vidrio de plomo, a ojo desnudo y mediante periscopio y también anteojo prismático Zeiss, sobre estativo (trípode) Linhof. El elemento aparecía algo flexionado con convexidad hacia arriba, como se representa exageradamente en Fig. 10.

La flexión mantenía su forma cóncava hacia abajo aunque se girara al EC, lo cual demuestra que era producida por el mayor peso conjunto de las secciones extremas, desde los puntos de apoyo. Hay que notar también que una flexión permanente apreciable hubiera impedido sacar al EC del canal correspondiente del reactor, cuyo diámetro es apenas mayor que el del elemento. La observación detallada no mostró ninguna anomalía del conjunto salvo algunas pequeñas rayaduras que se produjeron en el traslado y ubicación del elemento dentro de la celda.

Mediante periscopio doble acodado se pudo realizar una observación aún más detallada, sobre todo porque al no haber cristales gruesos de protección contra las radiaciones, la imagen es mucho más luminosa y nítida.

En estas condiciones se observó que entre la placa terminal superior y el hombro de los tapones de cada una de las barras existía una separación inferior a 0.5 mm. Se observaron detenidamente las placas terminales y los separadores como así también las zonas de soldadura tapón-vaina. En ningún caso se observó desplazamiento de separadores, grietas en las vainas ni corrosión en soldaduras ni empotramientos.

Se obtuvieron algunas fotos de zonas de interés en las cuales se ven algunas rayaduras. En esta misma posición se realizaron 6 tomas de fotografías con el objeto de realizar un posterior fotomontaje y tener una visión total del elemento.

La distorsión introducida por la ventana de la celda sumada al paralaje inevitable al hacer la toma de la foto no permite tener todas las secciones del elemento con un punto de vista que se pueda suponer en el infinito. Ello hace que cada sección del elemento se vea con una perspectiva distinta. Al unirse todas las tomas resulta un fotomontaje que se aparta sensiblemente de la realidad.

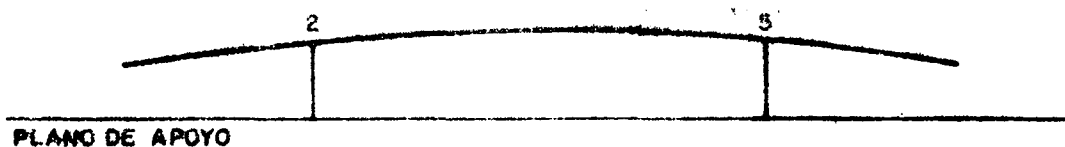


FIG. 10. - Flexión del Prototipo I

## 7.2. Separación entre barras

En un primer momento se había desistido de hacer estas mediciones, en vista de la uniformidad de aspecto, y la falta de torsión comprobable a la vista.

Sin embargo, a pedido de la misión CNEA se realizaron medidas de separación entre cuatro pares de barras, cada una de ellas en tres posiciones distintas: central y terminales; ver esquema, Fig. 11.

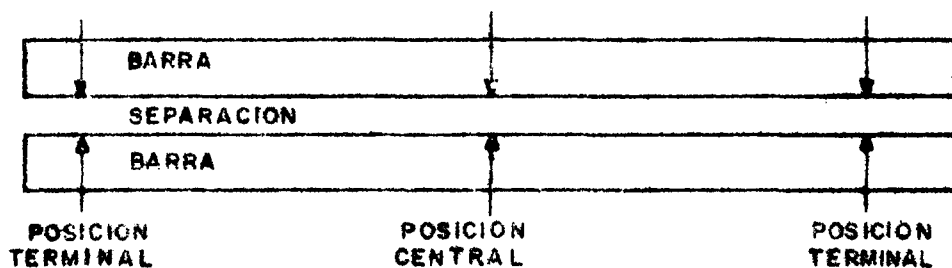


FIG. 11.

Las separaciones controladas estaban aproximadamente  $90^\circ$  una de otra. Cada medición se efectuó probando introducir entre las barras sondas "pasa-no pasa" de diámetro decreciente, hasta hallar aquella que calzara ajustadamente, tomándose su diámetro calibrado como medida de la separación. El diámetro de cada sonda era preciso al  $1/10$  mm.; la operación se efectuó con telemanipulador (Fig.12).

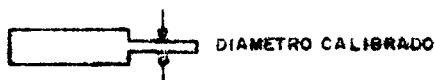


FIG. 12. - Sonda "pasa-no pasa"

Para las posiciones terminales de cada separación se obtuvieron valores dispares, pero que cayeron siempre dentro de las especificaciones de fabricación.

### 7.3. Desarmado del elemento

Las barras exteriores del manajo tienen en su extremo superior un remache pasante que las sujeta a la placa superior. En la placa inferior las barras van atornilladas. Para el desarmado se procedió a perforar con un taladro eléctrico las zonas de remaches. El hecho de no poseer una máscara adecuada para tal fin hizo que no se pudiera remover en forma total y de primera intención todos los remaches. Ello motivó que se usara un taladro en direcciones diagonales a los remaches con el objeto de remover los restos existentes. Del mismo modo se eliminaron los tornillos que sujetaban las barras 10 y 16. Luego para desprender la placa superior se usó el método de palanca entre el hombro del tapón y la placa. Con este palanqueo se desprende la placa de todas las barras menos dos (Nros. 10 y 16) que están atornilladas por sus extremos hembra. Los tornillos se destruyen perforando longitudinalmente, con lo cual la placa termina de desprenderse.

Remoción de los sunchos separadores: Para quitar los sunchos separadores se los cortó con una sierra similar a la usada en fomituras. Dicha sierra fue manejada directamente con los manipuladores. Una vez cortado el suncho se lo abrió forzando con los manipuladores, hasta poderlo quitar del manajo de barras.

Para destornillar las barras exteriores de la placa inferior se usó una herramienta como se describe: una pinza constituida sólo por brazos activos articulados mediante una unión flexible, tiene un tornillo pasante con mariposa. Las mordazas propiamente dichas son semicilindros de diámetro algo inferior al de la barra, maquinados en los extremos de los brazos activos y en forma transversal (para mejor comprensión ver el esquema Fig.13). Cada barra fue tomada con la herramienta descripta; se ajustó con la mariposa cuando el movimiento se hacía en sentido antihorario y se dejó suelta cuando el movimiento era en sentido horario. De esta manera se destornilló barra por barra.

En lo que se refiere al desarmado del elemento es necesario hacerlo con más cuidado o con otra técnica para que no se dañen los hombros de los tapones. Este daño va en detrimento de las mediciones de longitud con la precisión necesaria para hacer un estudio del comportamiento del combustible. En la posterior manipulación de las barras por separado es necesario actuar con precaución para evitar que las barras se rayen y luego puedan afectarse las mediciones.

### 7.4. Observación detallada e identificación de cada barra

Una vez desmontada cada barra se la ubicó sobre el plano de trabajo apoyada sobre un paño.

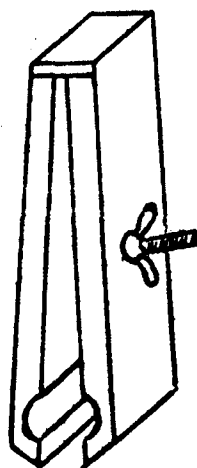


FIG. 13. - Pinza para destornillar barras

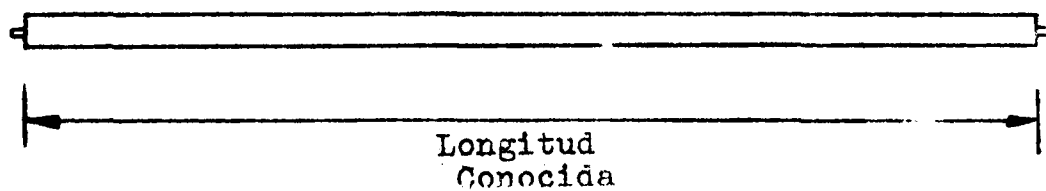


FIG. 14. - Patrón para medición de longitudes

Cada barra fue identificada por el número grabado sobre uno de los tapones; se comprobó una discrepancia con el protocolo de fabricación, pues la barra 13 T mencionada en éste se encontró sustituida por la 38 T.

Una vez destornilladas las barras una por una fueron observadas mediante un ante ojo de visión directa a través de la pared de la celda y también con ayuda del periscopio. No se observó en ninguna barra modificaciones de su superficie salvo las sufridas en el desarmado, como por ejemplo las deformaciones sufridas en el hombro de los tapones y las barras periféricas, y rayaduras pronunciadas en el lugar donde operaba la pinza para el destornillado. Se hicieron tomas fotográficas de zonas representativas de superficies normales y superficies rayadas, de algunas barras, para documentación.

#### 7.5. Observación de separadores

Los sunchos separadores del manojo de barras fueron observados mediante la ayuda del periscopio, no observándose corrosión ni daños superficiales que hagan suponer trabajo anormal o forzado de dichas piezas. También se tomaron fotos de las zonas representativas.

#### 7.6. Envase y depósito

Después de un examen individual, cada barra fue guardada dentro de un estuche cilíndrico con tapa, que a su vez fue alojado en un canal de un "cementerio" de canales cilíndricos verticales ubicado en la parte posterior de la celda 2, para su depósito hasta el momento de realizar sobre ella mediciones ulteriores.

#### 7.7. Medición del diámetro de las barras

Dado que se tenía como medida de diámetro pre-irradiación la correspondiente al diámetro interno de los tubos a 58 mm de cada extremo, se solicitó que la medición se efectuara en todas las barras a 58 mm del cordón de soldadura. Además se solicitó la medición del diámetro en forma continua a lo largo de toda una barra.

La máquina para la medición de diámetros consiste básicamente en una bancada similar a la de un torno con un plato rotativo que mediante una boquilla permite fijar la barra a medir. El dispositivo que oficia de contrapunta tiene también una boquilla en la cual puede entrar y girar libremente la barra a medir. El carro longitudinal permite desplazar los transductores todo a lo largo de la bancada. Tiene asimismo un juego de colizas transversales que permite situar los transductores sobre el eje del sistema o en otra posición.

El dispositivo de medida propiamente dicho está compuesto por un juego de cuchillas de acero rápido que tocan a la barra en posiciones diametralmente opuestas; las cuchillas pueden separarse o juntarse y están unidas a un transformador diferencial que trabaja a una frecuencia de 20 kHz. Al variar la separación de las cuchillas varía el acoplamiento entre primario y secundario y por ende la tensión inducida en el secundario. La precisión de la medida es de 0,001 mm. Las cuchillas tienen un radio de 0,6 mm en la zona de contacto con el elemento a medir. Para el presente caso todo el sistema se calibró con un patrón de acero inoxidable de diámetros 11,700 y 11,600 mm, es decir un salto de 100  $\mu$ m.

Para comparar los datos obtenidos con las mediciones que figuran en el Protocolo hay que tener en cuenta que éstas se refieren sólo a diámetro interno. Pueden calcularse diámetros externos sumando dos veces el espesor de la pared; este valor se conoce, sin embargo, dentro de un margen de tolerancia de  $\pm 10\%$ ; las medidas de diámetro interno están afectadas por una imprecisión de  $\pm 0,050$  mm. De la combinación límite de estos márgenes resultan los siguientes valores de diámetro externo calculado:

|                        |                            |
|------------------------|----------------------------|
| Diámetro máximo-máximo | $De = Di + 2 (e + 10\% e)$ |
| Diámetro máximo-mínimo | $De = Di + 2 (e - 10\% e)$ |
| Diámetro mínimo-máximo | $de = di + 2 (e + 10\% e)$ |
| Diámetro mínimo-mínimo | $de = di + 2 (e - 10\% e)$ |

Siendo  $Di = Dn \pm 0,050$  mm

$di = Dn - 0,050$  mm

$e = \text{espesor de pared} = 0,62$  mm

Si las especificaciones del fabricante son: diámetro interno nominal  $Dn = 10,500$  mm  $\pm 0,050$  mm, y el espesor de pared  $0,62$  mm  $\pm 10\%$ , entonces el máximo diámetro exterior que puede tener el tubo será 11,914 mm y el diámetro exterior mínimo será de 11,566 mm.

Estos cálculos se realizaron para ambos extremos de cada barra combustible. Con estos valores y con los medidos durante el ensayo se confeccionaron las Tablas N° 2 y N° 3.

De las barras 20T - 21T - 22T - 23T - 24T y 32T no se dispone de medidas pre-irradiación en el extremo superior. De la barra 24T no se realizó la medición a 58 mm del cordón de soldadura sino una medición continua en todo el largo.

Observando las tablas 3 y 4 se ve que en ningún caso se pasan los límites máximo y mínimo posibles según las especificaciones del fabricante de tubos.

En base a las medidas de que se disponía antes de irradiar no se puede decir que las barras se hayan dilatado o colapsado. Es necesario entonces tener en cuenta que cuando se desea hacer una experiencia para mediciones post-irradiación se

deben efectuar medidas antes de irradiar lo más similares que sea posible a las que se harán después de irradiación.

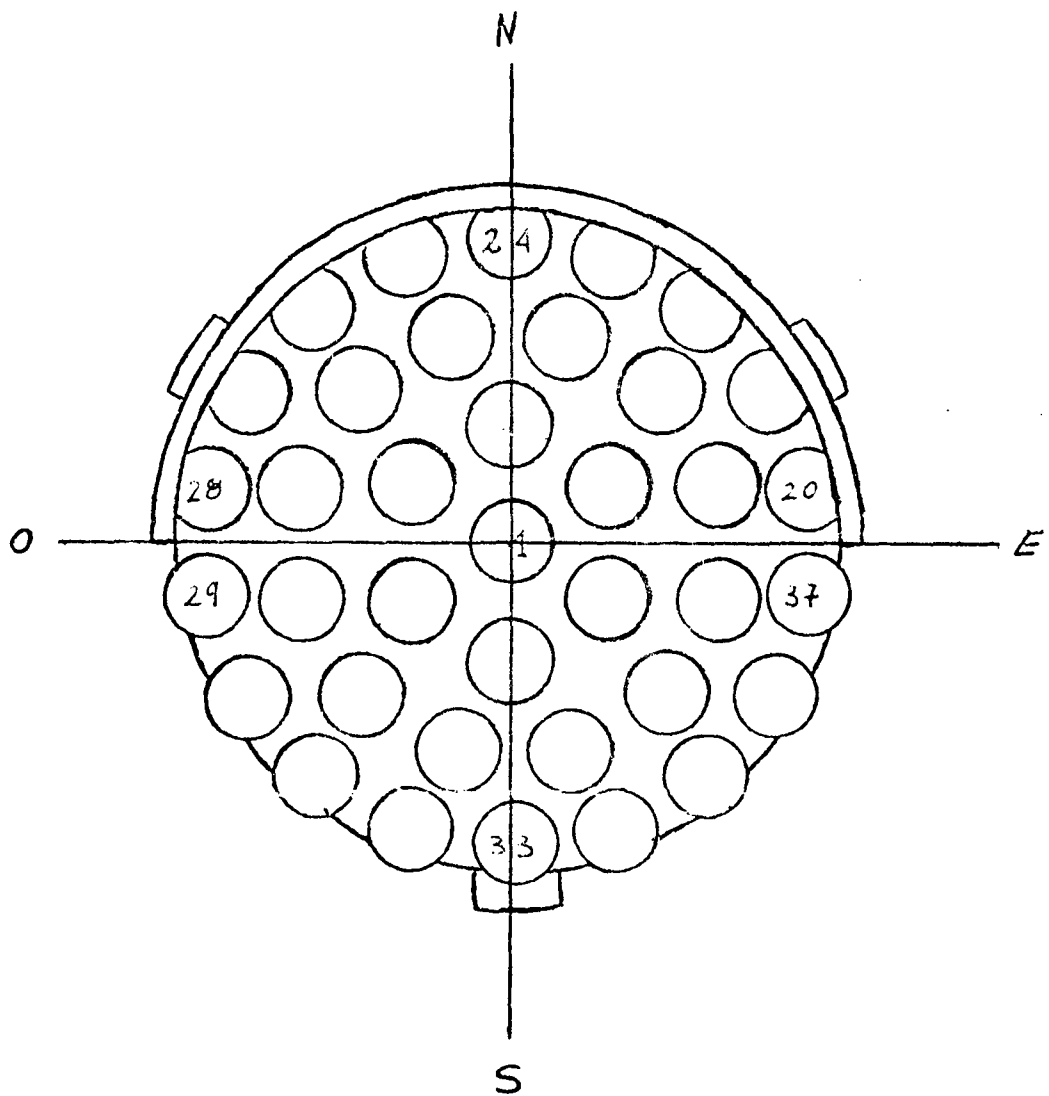


FIG. 15. - Corte transversal del Prototipo I visto desde arriba. Direcciones en que se estudió la elongación de las barras de combustible.

TABLA 3

EXTREMO SUPERIOR

Valor Máximo Posible 11914  $\mu\text{m}$

Valor Mínimo Posible 11566  $\mu\text{m}$

| BARRA<br>N° | PRE-IRRADIACION<br>CALCULADO  |                               | POST-IRRADIACION<br>MEDIDO    |                               |
|-------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|             | Valor Máximo<br>$\mu\text{m}$ | Valor Mínimo<br>$\mu\text{m}$ | Valor Máximo<br>$\mu\text{m}$ | Valor Mínimo<br>$\mu\text{m}$ |
| 1 T         | 11829                         | 11576                         | 11690                         | 11679                         |
| 2 T         | 11846                         | 11586                         | 11693                         | 11675                         |
| 3 T         | 11836                         | 11581                         | 11699                         | 11685                         |
| 4 T         | 11850                         | 11586                         | 11693                         | 11674                         |
| 5 T         | 11846                         | 11584                         | 11659                         | 11632                         |
| 6 T         | 11849                         | 11592                         | 11688                         | 11680                         |
| 7 T         | 11859                         | 11598                         | 11688                         | 11653                         |
| 8 T         | 11856                         | 11591                         | 11681                         | 11664                         |
| 9 T         | 11854                         | 11591                         | 11693                         | 11681                         |
| 10 T        | 11849                         | 11576                         | 11676                         | 11669                         |
| 11 T        | 11848                         | 11590                         | 11682                         | 11668                         |
| 12 T        | 11869                         | 11611                         | 11685                         | 11668                         |
| 14 T        | 11858                         | 11600                         | 11696                         | 11690                         |
| 15 T        | 11854                         | 11592                         | 11682                         | 11659                         |
| 16 T        | 11862                         | 11606                         | 11675                         | 11665                         |
| 17 T        | 11859                         | 11591                         | 11693                         | 11676                         |
| 18 T        | 11846                         | 11581                         | 11666                         | 11657                         |
| 19 T        | 11844                         | 11586                         | 11694                         | 11684                         |
| 20 T        | -                             | -                             | 11671                         | 11650                         |
| 21 T        | -                             | -                             | 11670                         | 11660                         |
| 22 T        | -                             | -                             | 11680                         | 11670                         |
| 23 T        | -                             | -                             | 11675                         | 11670                         |
| 24 T        | -                             | -                             | -                             | -                             |
| 25 T        | 11858                         | 11602                         | 11682                         | 11660                         |
| 26 T        | 11839                         | 11578                         | 11693                         | 11682                         |
| 27 T        | 11846                         | 11591                         | 11688                         | 11678                         |
| 28 T        | 11839                         | 11581                         | 11709                         | 11699                         |
| 29 T        | 11844                         | 11586                         | 11694                         | 11685                         |
| 30 T        | 11859                         | 11601                         | 11676                         | 11652                         |
| 31 T        | 11853                         | 11594                         | 11670                         | 11661                         |
| 32 T        | -                             | -                             | 11674                         | 11650                         |
| 33 T        | 11864                         | 11608                         | 11680                         | 11658                         |
| 34 T        | 11844                         | 11586                         | 11690                         | 11679                         |
| 35 T        | 11866                         | 11611                         | 11678                         | 11669                         |
| 36 T        | 11859                         | 11601                         | 11678                         | 11668                         |
| 37 T        | 11850                         | 11592                         | 11706                         | 11679                         |
| 38 T        | 11854                         | 11591                         | 11693                         | 11672                         |

TABLA 4

EXTREMO INFERIOR  
 Valor Máximo Posible 11914 m  
 Valor Mínimo Posible 11566 m

| BARRA<br>N° | PRE-IRRADIACION<br>CALCULADO |                   | POST-IRRADIACION<br>MEDIDO |                   |
|-------------|------------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|
|             | Valor Máximo<br>m            | Valor Mínimo<br>m | Valor Máximo<br>m          | Valor Mínimo<br>m |
| 1 T         | 11828                        | 11572             | 11678                      | 11652             |
| 2 T         | 11854                        | 11600             | 11672                      | 11657             |
| 3 T         | 11852                        | 11592             | 11669                      | 11654             |
| 4 T         | 11864                        | 11611             | 11674                      | 11652             |
| 5 T         | 11854                        | 11594             | 11692                      | 11672             |
| 6 T         | 11844                        | 11581             | 11665                      | 11652             |
| 7 T         | 11849                        | 11592             | 11681                      | 11665             |
| 8 T         | 11844                        | 11578             | 11686                      | 11662             |
| 9 T         | 11848                        | 11582             | 11689                      | 11665             |
| 10 T        | 11859                        | 11598             | 11689                      | 11665             |
| 11 T        | 11859                        | 11601             | 11687                      | 11663             |
| 12 T        | 11854                        | 11594             | 11675                      | 11660             |
| 14 T        | 11854                        | 11587             | 11685                      | 11675             |
| 15 T        | 11845                        | 11588             | 11677                      | 11658             |
| 16 T        | 11840                        | 11586             | 11691                      | 11672             |
| 17 T        | 11859                        | 11591             | 11698                      | 11632             |
| 18 T        | 11854                        | 11598             | 11648                      | 11630             |
| 19 T        | 11859                        | 11596             | 11662                      | 11654             |
| 20 T        | 11854                        | 11599             | 11674                      | 11654             |
| 21 T        | 11843                        | 11589             | 11681                      | 11659             |
| 22 T        | 11854                        | 11599             | 11675                      | 11645             |
| 23 T        | 11844                        | 11592             | 11684                      | 11665             |
| 24 T        | 11854                        | 11599             | -                          | -                 |
| 25 T        | 11840                        | 11581             | 11685                      | 11650             |
| 26 T        | 11854                        | 11599             | 11695                      | 11665             |
| 27 T        | 11854                        | 11586             | 11690                      | 11600             |
| 28 T        | 11859                        | 11601             | 11676                      | 11665             |
| 29 T        | 11856                        | 11602             | 11681                      | 11658             |
| 30 T        | 11850                        | 11593             | 11682                      | 11658             |
| 31 T        | 11844                        | 11586             | 11658                      | 11643             |
| 32 T        | 11850                        | 11594             | 11679                      | 11665             |
| 33 T        | 11849                        | 11591             | 11665                      | 11652             |
| 34 T        | 11859                        | 11606             | 11675                      | 11642             |
| 35 T        | 11844                        | 11586             | 11673                      | 11653             |
| 36 T        | 11839                        | 11581             | 11688                      | 11670             |
| 37 T        | 11854                        | 11597             | 11678                      | 11658             |
| 38 T        | 11859                        | 11600             | 11673                      | 11643             |

TABLA 5

| N°<br>BARRA | ANILLO<br>N° | Longitud<br>Pre-<br>Irradiac. | Longitud<br>Post-<br>Irradiac. | $\Delta l$<br>(mm) | $\Delta l$<br>(mm) | Totales<br>$\Delta l$<br>(mm) | Promedios<br>$\Delta l$<br>(mm) |
|-------------|--------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| Barra       |              |                               |                                |                    |                    |                               |                                 |
| 6 T         | Central      | 1845,2                        | 1846,74                        | 1,54               | 0,0835             | 1,54                          | 1,54                            |
| 1 T         | 1            | 1845,3                        | 1846,77                        | 1,47               | 0,0795             | 8,41                          | 1,41                            |
| 2 T         |              | 1845,4                        | 1846,82                        | 1,42               | 0,0768             |                               |                                 |
| 3 T         |              | 1845,3                        | 1846,83                        | 1,53               | 0,0826             |                               |                                 |
| 4 T         |              | 1845,4                        | 1846,69                        | 1,29               | 0,0700             |                               |                                 |
| 5 T         |              | 1845,3                        | 1846,66                        | 1,36               | 0,0736             |                               |                                 |
| 7 T         |              | 1845,2                        | 1846,54                        | 1,34               | 0,0725             |                               |                                 |
| 9 T         | 2            | 1845,2                        | 1846,35                        | 1,15               | 0,0622             | 15,23                         | 1,27                            |
| 8 T         |              | 1845,2                        | 1846,59                        | 1,39               | 0,0752             |                               |                                 |
| 19 T        |              | 1845,3                        | 1846,24                        | 0,94               | 0,0510             |                               |                                 |
| 10 T        |              | 1845,4                        | 1846,46                        | 1,06               | 0,0573             |                               |                                 |
| 11 T        |              | 1845,3                        | 1846,81                        | 1,51               | 0,0817             |                               |                                 |
| 12 T        |              | 1845,3                        | 1846,49                        | 1,19               | 0,0645             |                               |                                 |
| 38 T        |              | 1845,1                        | 1846,56                        | 1,46               | 0,0790             |                               |                                 |
| 14 T        |              | 1845,3                        | 1846,68                        | 1,38               | 0,0746             |                               |                                 |
| 18 T        |              | 1845,1                        | 1846,29                        | 1,19               | 0,0645             |                               |                                 |
| 15 T        |              | 1845,3                        | 1846,56                        | 1,26               | 0,0680             |                               |                                 |
| 16 T        | 3            | 1845,3                        | 1846,65                        | 1,35               | 0,0730             | 22,42                         | 1,27                            |
| 17 T        |              | 1845,3                        | 1846,65                        | 1,35               | 0,0730             |                               |                                 |
| 29 T        |              | 1925,4                        | 1826,57                        | 1,17               | 0,0640             |                               |                                 |
| 21 T        |              | 1795,88                       | 1797,18                        | 1,30               | 0,0720             |                               |                                 |
| 26 T        |              | 1825,3                        | 1826,66                        | 1,36               | 0,0745             |                               |                                 |
| 24 T        |              | 1825,3                        | 1826,61                        | 1,31               | 0,0718             |                               |                                 |
| 28 T        |              | 1825,5                        | 1826,77                        | 1,27               | 0,0695             |                               |                                 |
| 23 T        |              | 1825,4                        | 1826,64                        | 1,24               | 0,0680             |                               |                                 |
| 25 T        |              | 1825,3                        | 1826,62                        | 1,32               | 0,0724             |                               |                                 |
| 20 T        |              | 1795,93                       | 1797,27                        | 1,34               | 0,0745             |                               |                                 |
| 27 T        |              | 1825,2                        | 1826,49                        | 1,29               | 0,0706             |                               |                                 |
| 35 T        |              | 1825,4                        | 1826,59                        | 1,19               | 0,0650             |                               |                                 |
| 36 T        | E            | 1825,2                        | 1826,52                        | 1,32               | 0,0720             | 22,42                         | 1,27                            |
| 34 T        | A X          | 1925,2                        | 1826,46                        | 1,26               | 0,0690             |                               |                                 |
| 37 T        | N T          | 1825,3                        | 1826,52                        | 1,22               | 0,0668             |                               |                                 |
| 22 T        | I E          | 1795,86                       | 1797,14                        | 1,28               | 0,0710             |                               |                                 |
| 30 T        | L R          | 1825,3                        | 1826,51                        | 1,21               | 0,0662             |                               |                                 |
| 33 T        | L I          | 1825,4                        | 1826,66                        | 1,26               | 0,0690             |                               |                                 |
| 31 T        | O O          | 1825,3                        | 1826,66                        | 1,36               | 0,0745             |                               |                                 |
| 32 T        | R            | 1825,3                        | 1826,52                        | 1,22               | 0,0669             |                               |                                 |

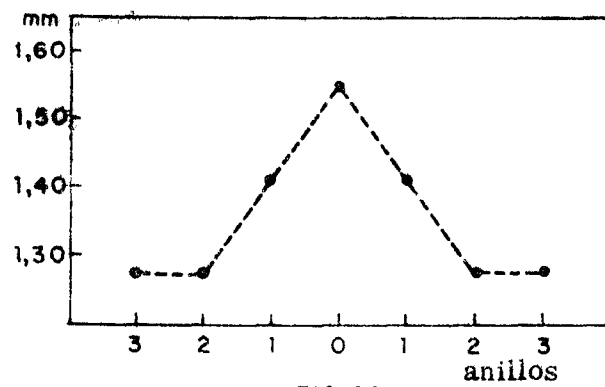


FIG. 16

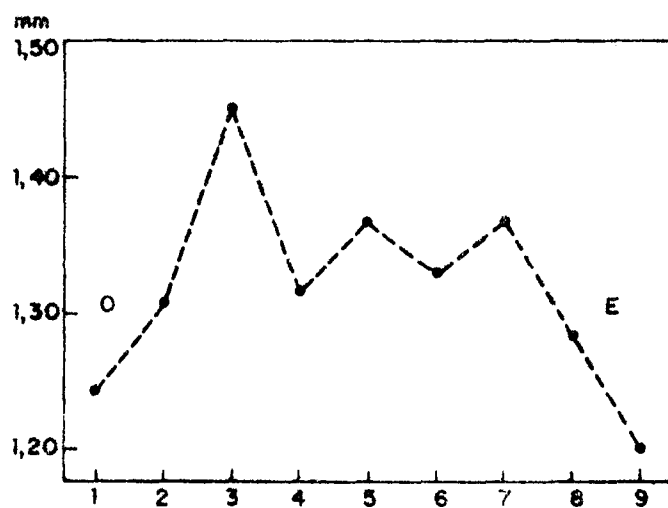


FIG. 17

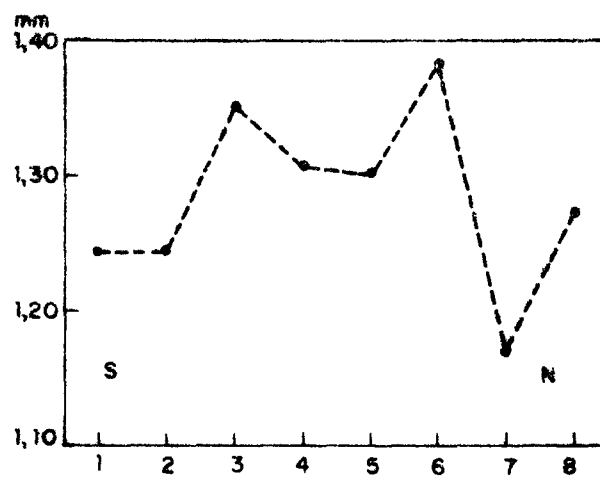


FIG. 18

TABLA 6

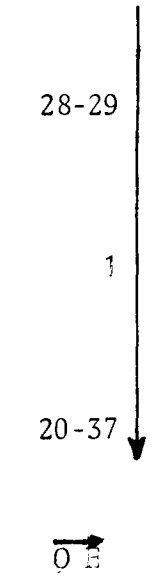
| DIRECCION                                                                         | Nº PLANO | POSICIONES  | BARRA<br>Nº | $\Delta l$<br>(mm) | Promedios |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------|-------------|-------------|--------------------|-----------|
|  | 1        | 28-29       | 27 T        | 1,29               | 1,24      |
|                                                                                   |          |             | 35 T        | 1,19               |           |
|                                                                                   | 2        | 26-13-14-31 | 25 T        | 1,32               | 1,31      |
|                                                                                   |          |             | 12 T        | 1,19               |           |
|                                                                                   |          |             | 38 T        | 1,46               |           |
|                                                                                   |          |             | 34 T        | 1,26               |           |
|                                                                                   | 3        | 12-15       | 11 T        | 1,51               | 1,45      |
|                                                                                   |          |             | 14 T        | 1,38               |           |
|                                                                                   | 4        | 25-4-5-32   | 23 T        | 1,24               | 1,32      |
|                                                                                   |          |             | 3 T         | 1,53               |           |
|                                                                                   |          |             | 4 T         | 1,29               |           |
|                                                                                   |          |             | 37 T        | 1,22               |           |
|                                                                                   | 5        | 24-3-1-6-33 | 28 T        | 1,27               | 1,37      |
|                                                                                   |          |             | 2 T         | 1,42               |           |
|                                                                                   |          |             | 6 T         | 1,54               |           |
|                                                                                   |          |             | 5 T         | 1,36               |           |
|                                                                                   |          |             | 22 T        | 1,28               |           |
|                                                                                   | 6        | 23-2-7-34   | 24 T        | 1,31               | 1,33      |
|                                                                                   |          |             | 1 T         | 1,47               |           |
|                                                                                   |          |             | 7 T         | 1,34               |           |
|                                                                                   |          |             | 30 T        | 1,21               |           |
|                                                                                   | 7        | 9-18        | 8 T         | 1,39               | 1,37      |
|                                                                                   |          |             | 16 T        | 1,35               |           |
|                                                                                   | 8        | 22-8-19-35  | 26 T        | 1,36               | 1,28      |
|                                                                                   |          |             | 9 T         | 1,15               |           |
|                                                                                   |          |             | 17 T        | 1,35               |           |
|                                                                                   |          |             | 33 T        | 1,26               |           |
|                                                                                   | 9        | 20-37       | 29 T        | 1,17               | 1,20      |
|                                                                                   |          |             | 32 T        | 1,22               |           |

TABLA 7

| DIRECCION                                                                         | N° PLANO | POSICIONES      | BARRA<br>N° | $\Delta l$<br>(mm) | Promedios |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------------|-------------|--------------------|-----------|
|  | 1        | 32-33-34        | 37 T        | 1,22               | 1,24      |
|                                                                                   |          |                 | 22 T        | 1,28               |           |
|                                                                                   |          |                 | 30 T        | 1,21               |           |
|                                                                                   | 2        | 31-16-17-35     | 34 T        | 1,26               | 1,24      |
|                                                                                   |          |                 | 18 T        | 1,19               |           |
|                                                                                   |          |                 | 15 T        | 1,26               |           |
|                                                                                   |          |                 | 33 T        | 1,26               |           |
|                                                                                   | 3        | 30-15-18-36     | 36 T        | 1,32               | 1,35      |
|                                                                                   |          |                 | 14 T        | 1,38               |           |
|                                                                                   |          |                 | 16 T        | 1,35               |           |
|                                                                                   |          |                 | 31 T        | 1,36               |           |
|                                                                                   | 4        | 29-14-5-7-19-37 | 35 T        | 1,19               | 1,31      |
|                                                                                   |          |                 | 38 T        | 1,46               |           |
|                                                                                   |          |                 | 4 T         | 1,29               |           |
|                                                                                   |          |                 | 7 T         | 1,34               |           |
|                                                                                   |          |                 | 17 T        | 1,35               |           |
|                                                                                   |          |                 | 32 T        | 1,22               |           |
|                                                                                   | 5        | 28-13-4-2-8-20  | 27 T        | 1,29               | 1,30      |
|                                                                                   |          |                 | 12 T        | 1,19               |           |
|                                                                                   |          |                 | 3 T         | 1,53               |           |
|                                                                                   |          |                 | 1 T         | 1,47               |           |
|                                                                                   |          |                 | 9 T         | 1,15               |           |
|                                                                                   | 6        | 27-12-9-21      | 29 T        | 1,17               | 1,38      |
|                                                                                   |          |                 | 20 T        | 1,34               |           |
|                                                                                   |          |                 | 11 T        | 1,51               |           |
|                                                                                   |          |                 | 8 T         | 1,39               |           |
|                                                                                   | 7        | 26-11-10-22     | 21 T        | 1,30               | 1,17      |
|                                                                                   |          |                 | 25 T        | 1,32               |           |
|                                                                                   |          |                 | 10 T        | 1,06               |           |
|                                                                                   |          |                 | 19 T        | 0,94               |           |
|                                                                                   | 8        | 25-24-23        | 26 T        | 1,36               | 1,27      |
|                                                                                   |          |                 | 23 T        | 1,24               |           |
|                                                                                   |          |                 | 28 T        | 1,27               |           |
|                                                                                   |          |                 | 24 T        | 1,31               |           |

### 7.8. Medición de la longitud de las barras

Esta medición se hizo utilizando el banco de medida que se describe a continuación: la estructura fundamental es un perfil de acero inoxidable con una cola en su parte superior en la cual se pueden desplazar topes y apoyos en V de altura regulable. Para efectuar la medida, a la barra se la hace hacer tope en el hombro del tapón inferior. Toda la barra se encuentra soportada en su longitud por cuatro apoyos regulables en altura. En el otro extremo se tiene un comparador centesimal cuyo palpador hace tope en el hombro del tapón superior de la barra.

El método de medida que se usó fue el siguiente:

- 1 - se coloca en el banco de medida una barra cuya forma es la que se indica en la Fig. 145 y cuya longitud entre hombros es bien conocida.
- 2 - fijada la barra se desplaza el soporte que tiene el comparador centesimal hasta que en dicho comparador se lee 0,00 mm.
- 3 - se fija ese tope y se quita la barra patrón.
- 4 - se procede luego a colocar las barras a medir.
- 5 - lo que indica el comparador centesimal en más o en menos es lo que hay que sumar o restar a la longitud de la barra patrón para saber el valor correcto de la medida.

Se ha confeccionado una tabla en la cual se agruparon las barras según el anillo al que corresponden en el elemento combustible. El objeto de este agrupamiento es ver si la dilatación de las barras periféricas es igual al de las barras centrales. Esta tabla de valores no se puede considerar muy representativa pues ciertos anillos contienen pocos ejemplares. Ver Tabla 5.

Dado que en la vecindad del elemento combustible había en el reactor elementos enriquecidos se efectuó un estudio de las barras en las direcciones simuladas Norte-Sud y Este-Oeste (ver esquema Fig.15).

Los valores de la Tabla N° 5 volcados al gráfico Fig.16 muestran que aparentemente la barra central y el primer anillo se dilataron más que los anillos N° 2 y 3 que son exteriores. En el estudio hecho en las direcciones simuladas Este-Oeste y Norte-Sud, cuyos valores fueron volcados en los gráficos Figs. 17 y 18, parece haber una tendencia leve de aumento de longitud en la dirección E-O. Tal vez ello sea debido a que próximo a la zona 0 había elementos enriquecidos, y por ende el quemado haya sido algo mayor. Los gráficos N° 17 y 18 son resultado de tablas 6 y 7.

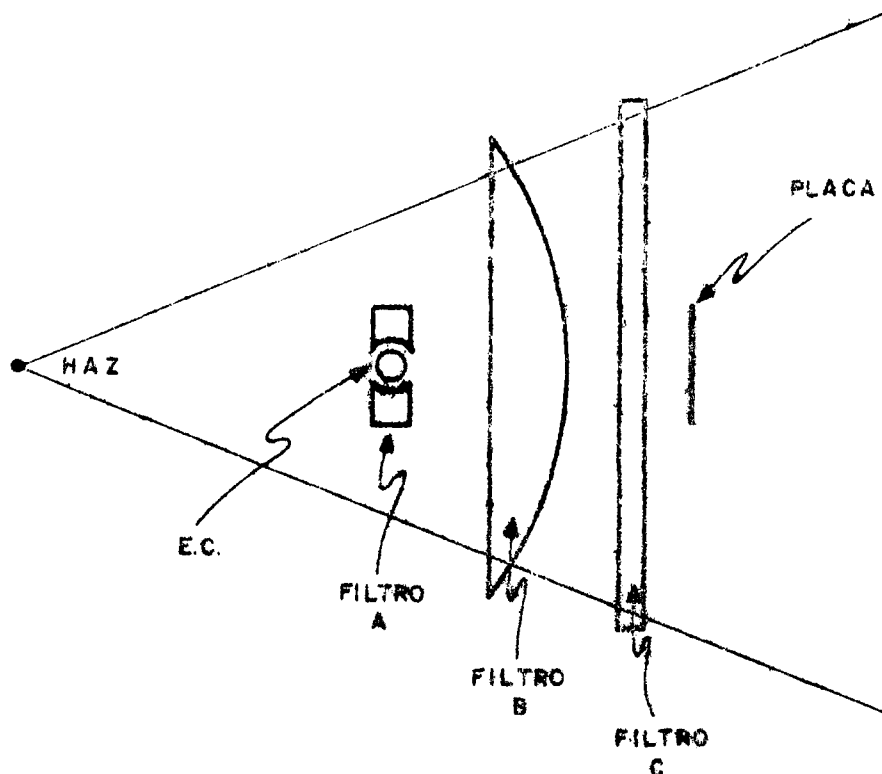


FIG. 19. - Instalación para radiografiar elementos combustibles.

### 7.9. Radiografía

A fin de radiografiar a través del blindaje utilizado para evitar el velado de placa fotográfica por las radiaciones beta y gamma emitidas por la muestra radioactiva, se usó una fuente de rayos X constituida por un betatrón que acelera electrones hasta 23 MeV. Estos inciden sobre un blanco de tungsteno del cual surge un chorro intenso de rayos X de frenamiento (Bremsstrahlung) cuya energía de corte es también de 23 MeV.

Cuando el betatrón no está en uso se lo mantiene en el "hall" técnico, encima de las celdas calientes. El hall tiene un puente grúa de 20 toneladas de capacidad portante; mediante el mismo el betatrón es descendido y ubicado frente a la puerta esclusa, abierta, de la celda N° 1. Desde ese punto, durante la operación de radiografiado, el haz de bremsstrahlung penetra en la celda en forma de cono, atraviesa la muestra (barra del Prototipo-I, en el caso presente) colocada horizontalmente en el sentido transversal al haz, y llega a la placa fotográfica a través del filtro de hierro B (ver Fig.19) que tiene por objeto homogeneizar la

intensidad de radiación y absorber los rayos beta y gamma procedentes de la muestra; el filtro C, de hierro, es un suplemento que se añade cuando debido a la intensidad de radiación el B es insuficiente. El filtro A, de plomo, tiene una función compensatoria para corregir por el desigual espesor atravesado por los rayos X a causa de la sección circular de la muestra.

Se radiografió la porción superior (150 mm) de cada una de las barras 6T, 24T, y 28T, y la porción inferior de cada una de las barras 3T, 10T, 11T y 25T.

La barra 23T se radiografió entera. Como el diámetro de la sección del cono de bremsstrahlung es mucho menor que la longitud de la barra, se requirieron varias exposiciones distintas para cubrir toda la longitud.

Las radiografías muestran claramente las pastillas de UO<sub>2</sub> separadas por sus concavidades ("dishings") y detalles correspondientes al estado de las mismas, tales como fisuraciones y rupturas, etc. Pueden apreciarse también otras particularidades, como por ejemplo la colocación invertida de la 26ª pastilla de la barra 23T.

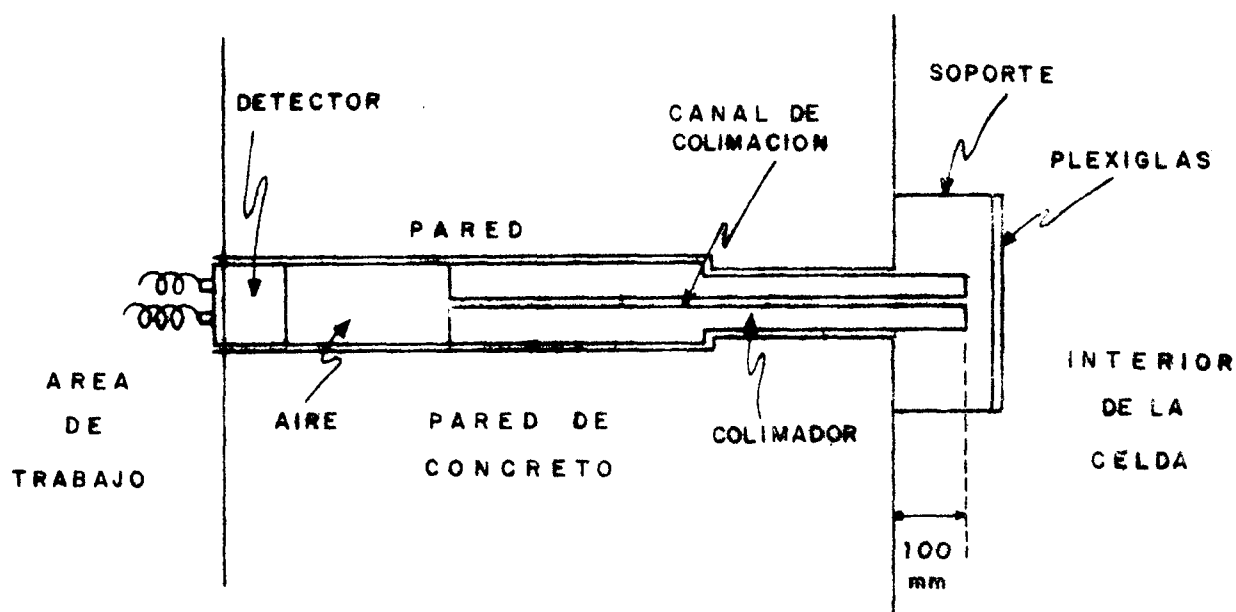


FIG. 20. - Dispositivo colimador y detector para "scanning" gamma.

#### 7.10. "Scanning" gamma

Se realizó la exploración longitudinal de actividad gamma sobre las barras del sector enfrentado al centro del reactor, como se muestra en el Esquema Fig.8; ellas son:

|                   |                |
|-------------------|----------------|
| Anillo exterior : | 24T, 28T y 23T |
| Anillo N° 2 :     | 19T y 10T      |
| Anillo N° 1 :     | 2T             |

La instalación para gamma scanning, en la celda N° 4, comprende una ranura de colimación que atraviesa la pared frontal, una bancada similar a la de un torno para desplazar las barras frente al colimador a velocidad uniforme, y un detector de radiación gamma con equipo auxiliar, fuera de la celda, frente al colimador.

El colimador se representa esquemáticamente en Fig.20. Comprende una pieza cilíndrica de acero, intercambiable con otras similares y atravesada longitudinalmente por un canal (la "ranura" de colimación).

El cilindro de acero tiene 700 mm de largo y se coloca en un alojamiento cilíndrico que atraviesa la pared de la celda, que en ese sitio tiene 900 mm de espesor.

Cada colimador intercambiable tiene una ranura de diferente sección; ninguna de ellas es graduable. Las secciones son: 1 mm x 1 mm; 2 mm x 2 mm; 0,5 mm x 20 mm.

La selección del colimador a usar durante una operación de scanning depende de la intensidad de la radiación; se realiza probando en base a la experiencia del operador.

El movimiento de cada barra del Prototipo-I se efectuó a la velocidad de 150 mm/hora; el tiempo total mínimo empleado para examinar una barra entera es por lo tanto de unas 13 horas, añadiendo el requerido para reacomodar la barra varias veces, pues el aparato no permite pasar toda la longitud, de una vez, frente al colimador; en cada desplazamiento el equipo puede medir una longitud de 300 mm.

El detector es un cristal semiconductor de germanio (litio), conectado apropiadamente a un analizador multicanal; el registro de datos se obtiene por dos vías: impresión por teletipo, y gráfico por registrador de tensión variable.

La exploración se realiza sobre dos bandas de energía simultáneamente: 400-1700 keV y 638-684 keV; la segunda banda tiene por objeto cubrir el pico de 662 keV del  $^{137}\text{Cs}$ , dentro del margen de  $\pm 23$  keV aproximadamente.

La relación entre velocidad del registrador gráfico y velocidad de desplazamiento de la muestra es 1:1. En las Figs. 21 y 22 se muestran parcialmente los dos "scans" de la barra 23 T como ejemplo.

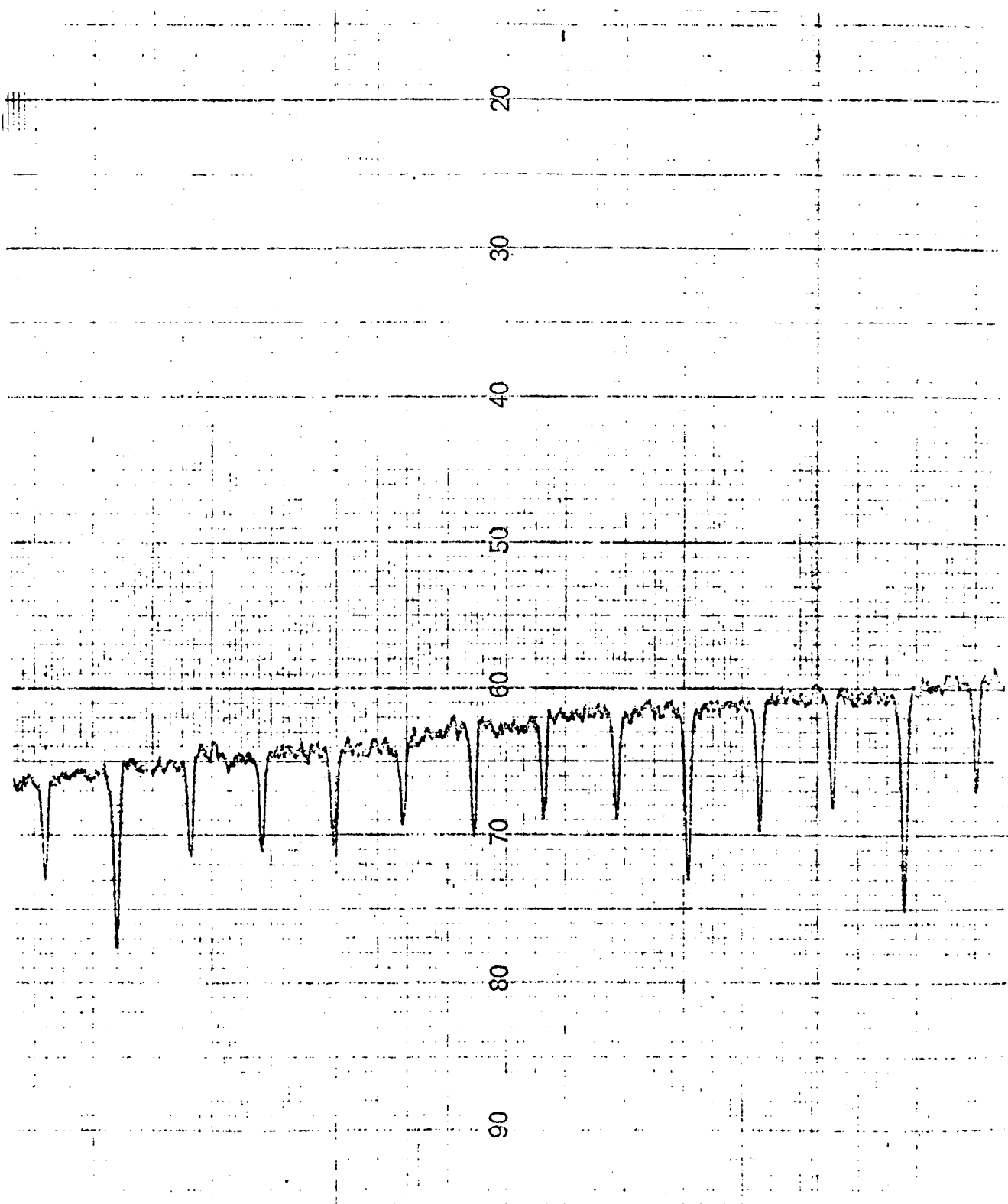


FIG. 21. Fragmento del "scan" de la barra  $^{23}\text{T}$  entre 400 y 1700 keV.

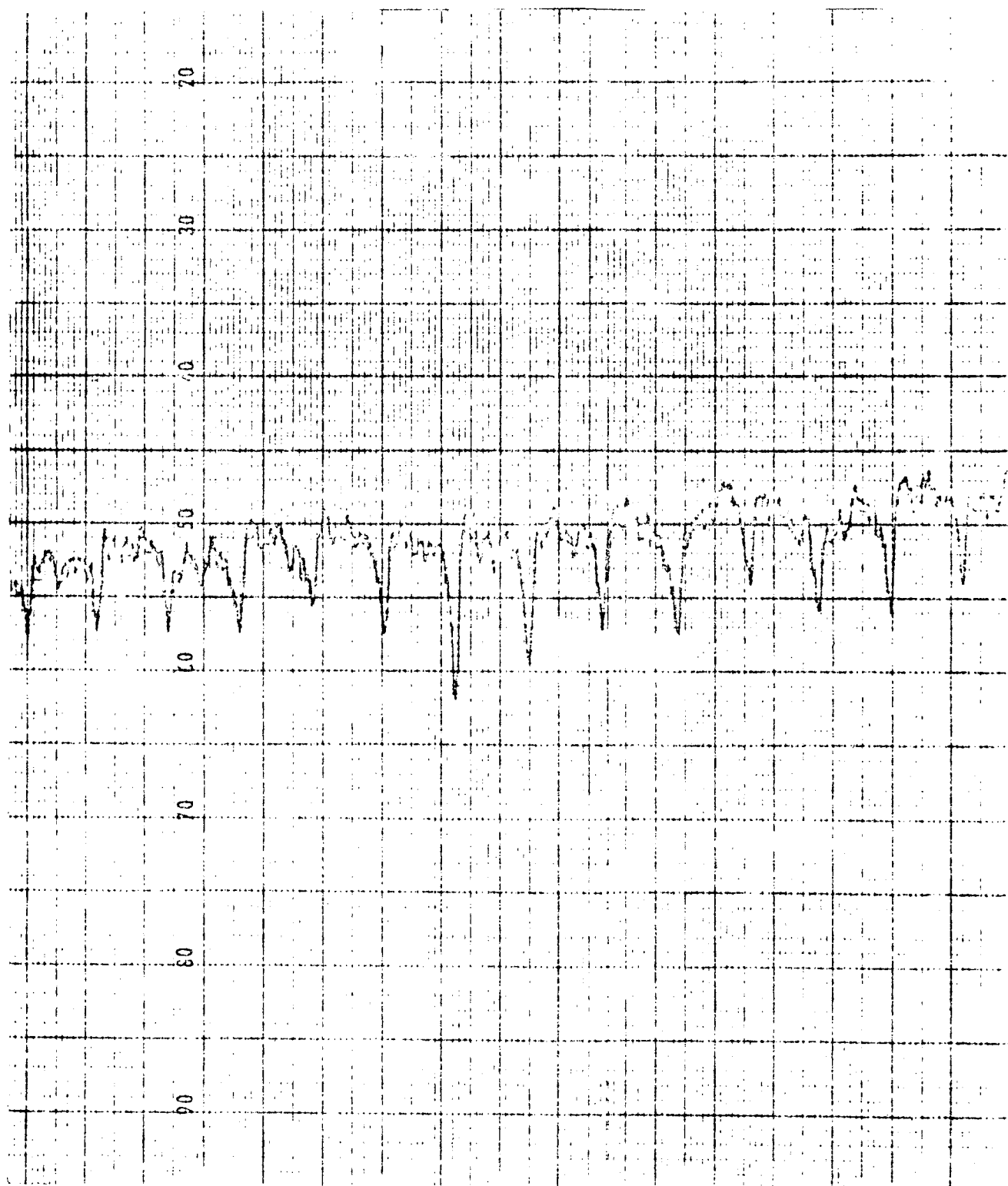


FIG. 22. Fragmento del "scan" de la barra  $^{23}\text{T}$  entre 638 y 684 keV.

La observación de los "scans" o registros obtenidos permite reconocer:

- 1 - Variación discontinua periódica de la actividad; esto es, a un registro "de fondo" ligeramente irregular se añaden disminuciones bruscas y breves de actividad a distancias de 12,5 mm una de otra; estas caídas corresponden a la disminución en la cantidad de material emisor que se produce entre pastilla y pastilla de  $UO_2$  irradiado.
- 2 - Algunas veces las irregularidades de fondo se hacen más importantes en amplitud y anchura, denotando roturas, fisuras, etc., en el óxido de uranio.
- 3 - Haciendo abstracción de las irregularidades y descensos periódicos descritos, todos los registros muestran un aumento regular pero no lineal de actividad desde el extremo superior hacia el inferior de cada barra.

Las relaciones de actividades en ambos extremos, medidas sobre la quinta pastilla desde la punta en ambos casos con el fin de evitar desviaciones que se producen sobre las pastillas terminales, y corregidas por el registro del fondo más afuera de cada extremo, se reúnen en las Tablas 8 y 9.

| BARRA | Actividades sobre Extremos<br>Inferior<br>(cps) | Superior<br>(cps) | Relación de<br>actividades<br>(Inf./Sup.) |
|-------|-------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------|
| 2 T   | 50,5                                            | 16,5              | 3,06                                      |
| 10 T  | 57,0                                            | 18,0              | 3,17                                      |
| 19 T  | 48,0                                            | 13,0              | 3,48                                      |
| 23 T  | 68,0                                            | 21,0              | 3,24                                      |
| 24 T  | 55,0                                            | 18,0              | 3,06                                      |
| 28 T  | 64,5                                            | 19,0              | 3,40                                      |

Banda alrededor de 662 keV

TABLA 8

| BARRA | Actividades sobre Extremos<br>Inferior<br>(cps) | Superior<br>(cps) | Relación de<br>actividades<br>(Inf./Sup.) |
|-------|-------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------|
| 2 T   | 980                                             | 350               | 2,80                                      |
| 10 T  | 1150                                            | 350               | 3,29                                      |
| 19 T  | 1030                                            | 332               | 3,11                                      |
| 23 T  | 1410                                            | 405               | 3,48                                      |
| 24 T  | 1490                                            | 475               | 3,14                                      |
| 28 T  | 1300                                            | 380               | 3,42                                      |

Banda de 400-1700 keV

TABLA 9

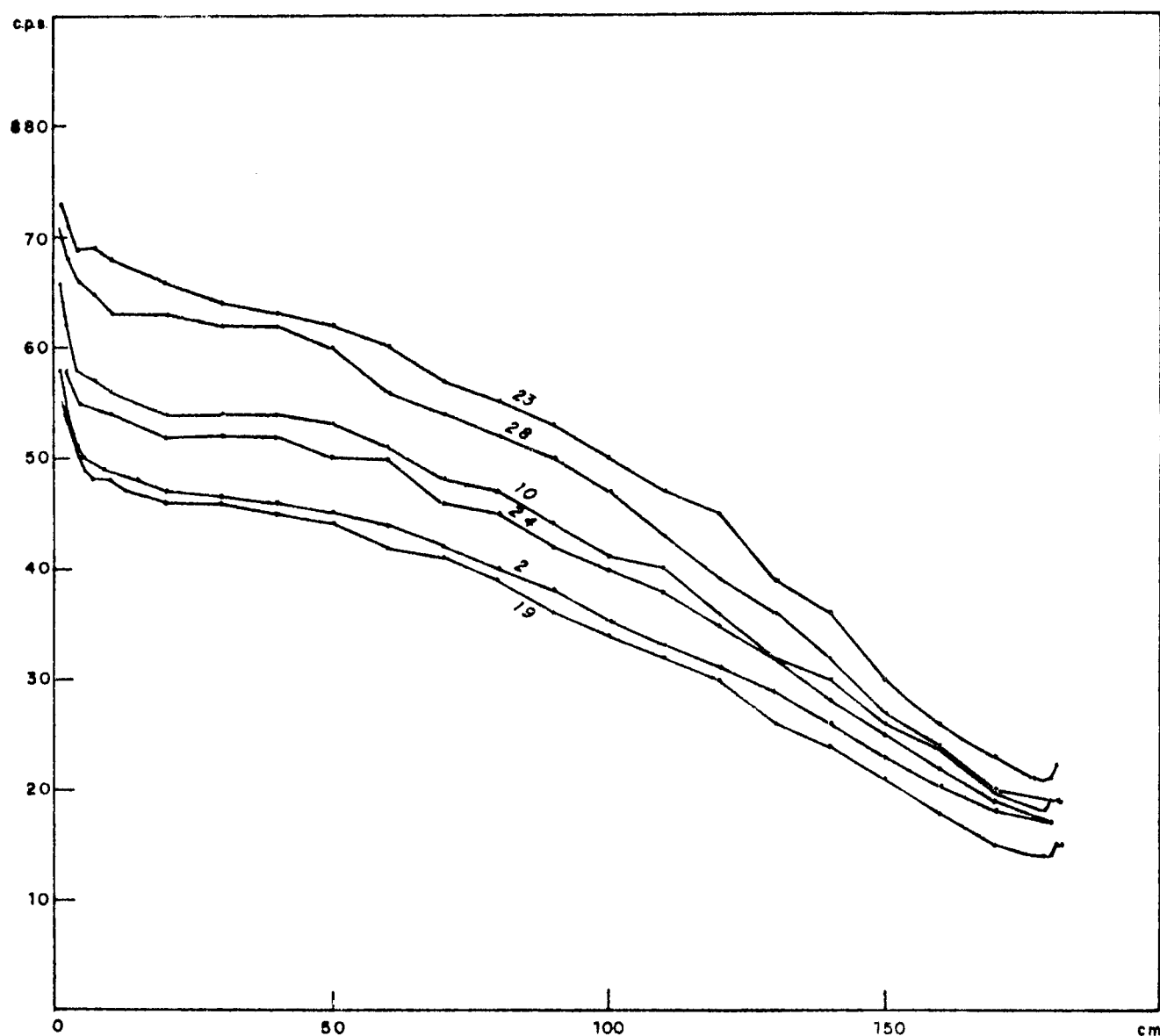


FIG. 23. Reducción de los "scans" de las barras entre 400 y 1700 keV. Los valores en ordenadas dan actividad registrada y las abscisas representan distancias desde el extremo inferior de la barra en cada caso. Los números colocados sobre las curvas dan las designaciones de las barras correspondientes.

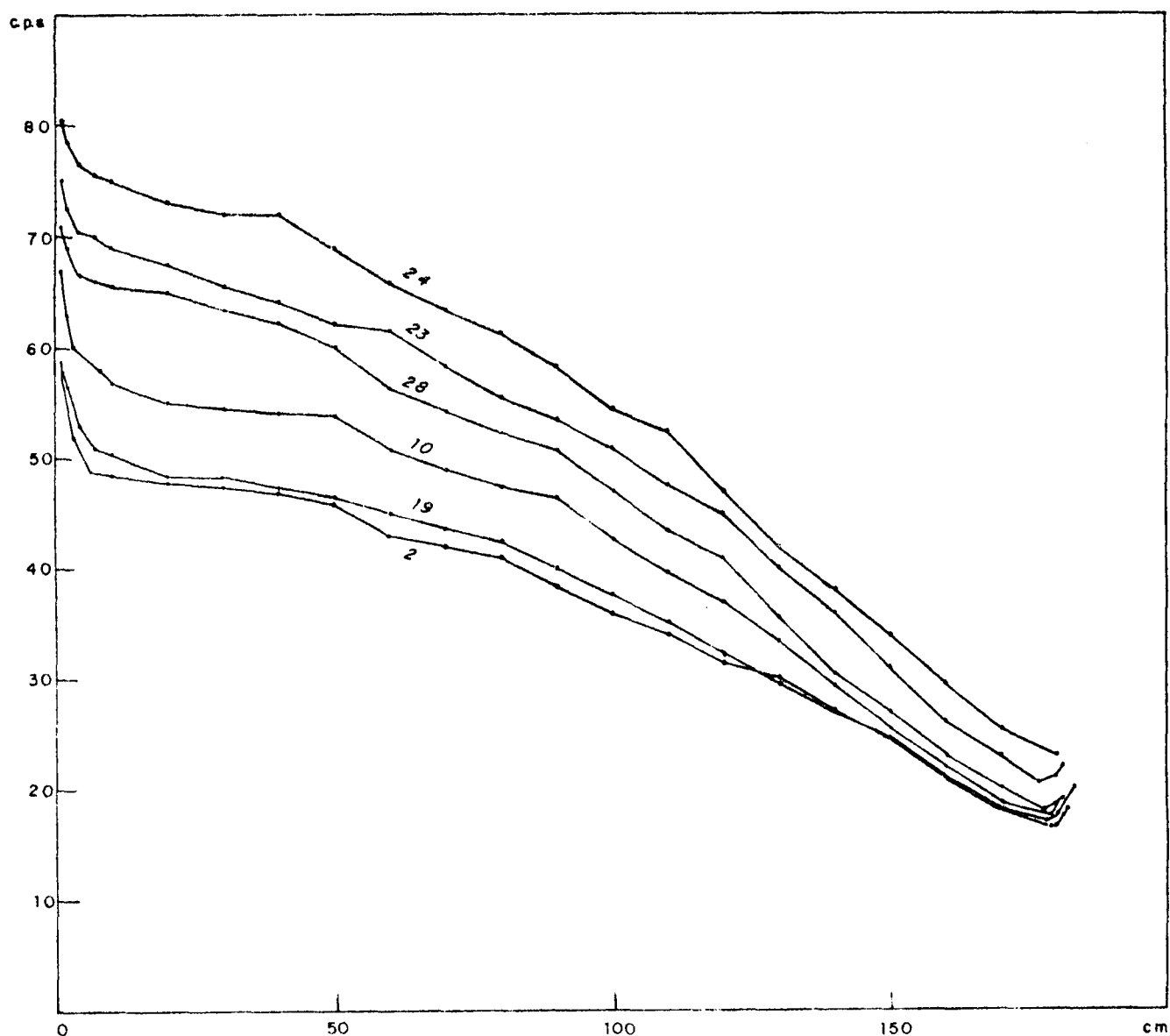


FIG. 24. Reducción de los "scans" de las barras a unos 662 keV. Los valores en ordenadas dan actividad registrada y las abscisas representan distancias desde el extremo inferior de la barra en cada caso. Los números colocados sobre las curvas dan las designaciones de las barras correspondientes.

En la Tabla 10 se da la comparación entre "actividad promedio" de gamma-scanning y valores de actividad medida en el centro de cada barra. Se puede observar que la actividad central medida es siempre mayor que el promedio entre actividades de los extremos. Esto se debe a que la variación no es lineal sino curva, con concavidad hacia los ejes actividad-longitud.

| BANDA | 662 keV   |        | 400-1700 keV |        |
|-------|-----------|--------|--------------|--------|
| BARRA | Calculado | Medido | Calculado    | Medido |
| 2 T   | 33,5      | 36,5   | 665          | 760    |
| 10 T  | 37,5      | 43,5   | 750          | 895    |
| 19 T  | 30,9      | 35,4   | 681          | 776    |
| 23 T  | 44,5      | 52,0   | 907,5        | 1078   |
| 24 T  | 36,5      | 42,3   | 982,5        | 1278   |
| 28 T  | 41,8      | 49,3   | 840          | 1000   |

TABLA 10

En la Fig. 23 se presenta un re-graficado de los scans de las seis barras entre 400 y 1700 keV, a escala reducida. Los scans han sido "alisados" respecto de la variación fina de actividad, con el objeto de mostrar especialmente las diferencias de actividad de las distintas barras, y las formas de la distribución de actividad en cada caso.

En la Fig.24 se presentan, similarmente re-graficados, scans tomados alrededor de los 662 keV. Puede notarse que las curvas no tienen un curso estrictamente monótono, sino que muestran pequeñas depresiones y salientes que les dan cierto aspecto de guirnalda, fenómeno que no se nota a la escala de los scans originales. Es también general el aumento de actividad sobre ambos extremos de cada barra; la actividad es en todos los casos, por otra parte, unas tres veces mayor en el extremo inferior que en el extremo superior de las barras.

Las intensidades de los scans a "662 keV" y a 400-1700 keV respectivamente no son paralelas en magnitud. Considerando magnitudes crecientes de actividad en la zona media de los scans pueden observarse, en efecto, las siguientes ordenaciones:

"662 keV"      19 T, 2 T, 24 T, 10 T, 28 T y 23 T

400-1700 keV : 2 T, 19 T, 10 T, 28 T, 23 T y 24 T

Este hecho revela la distribución diferenciada de productos de fisión, que puede ser debida a distintas causas, como por ejemplo variaciones de rendimientos de fisión por variaciones locales de espectro neutrónico, migración diferenciada y/o concentración localizada de algunos de los productos, etc.

## 7.11. Espectrometría gamma

### 7.11.1. Técnica. Resultados

Los espectros de rayos gamma obtenidos fueron tres o cuatro por barra de combustible (a excepción de la barra 24 T, para la cual no se obtuvo ninguno), sobre los extremos y la región central. Se utilizó la misma instalación empleada para realizar el registro de actividad durante los scannings gamma. El registro de la distribución energética se realizó en cada caso mediante teletipo, y además se inscribieron los puntos correspondientes a los datos digitales mediante graficador x-y; el operador reunió los puntos manualmente (ver, por ejemplo, el espectro B de la barra 28 T, Fig. 25).

Cada espectro se representó dividido en dos escalas, una 100 veces menor que la otra, para compensar por la baja actividad en la banda de energías más elevadas. Las escalas de los gráficos son, por ejemplo:

- entre 57 y 800 keV : 12.500 cuentas (en 20 minutos) por cm.
- entre 800 y 1880 keV : 125 cuentas (en 20 minutos) por cm.

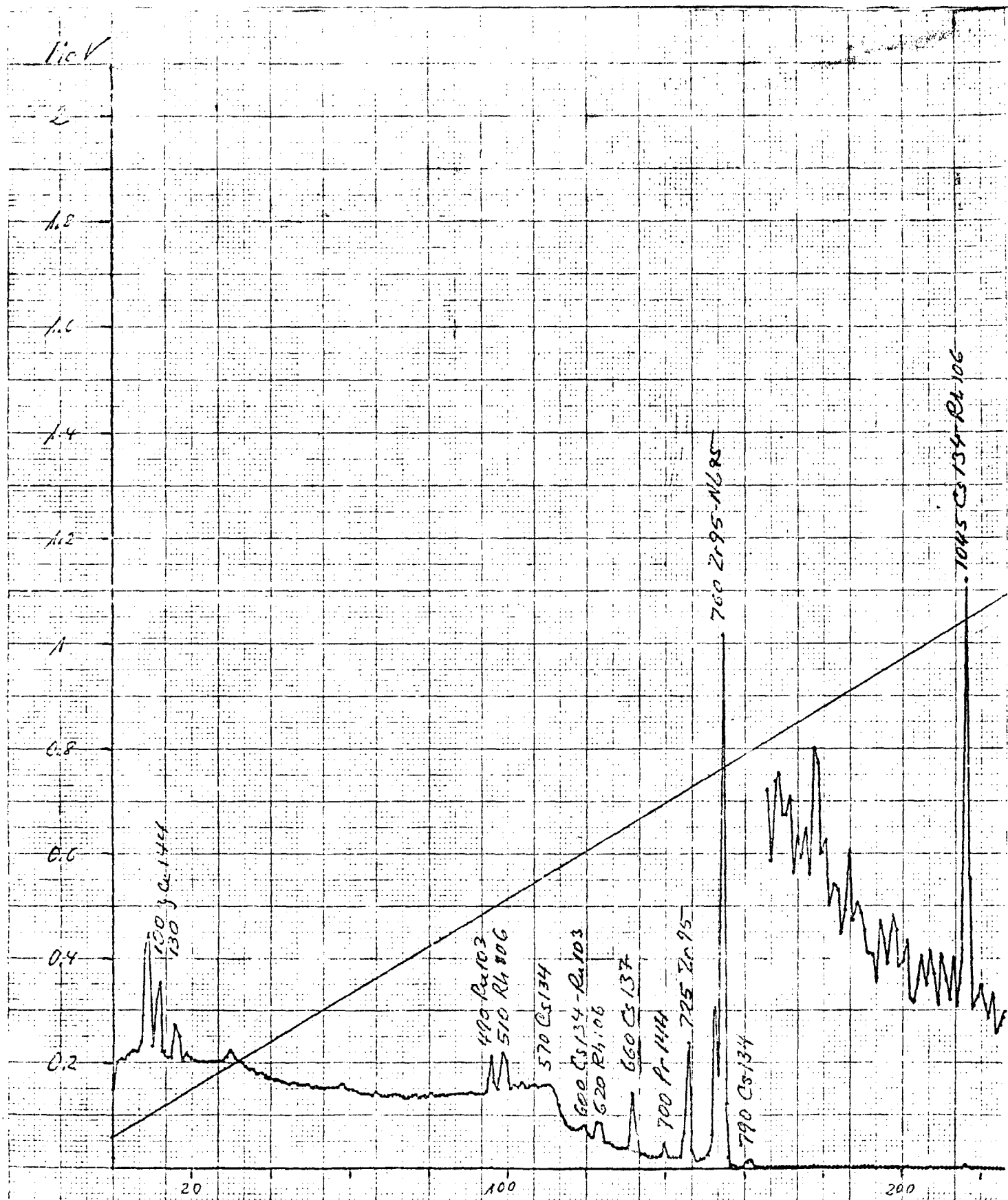
Se puede verificar la presencia en los espectros, con mayor o menor intensidad relativa, de los picos correspondientes a los radionucleídos y pares genéticos en equilibrio que aparecen en la Tabla 11.

Puede observarse que se han identificado productos de fisión de seis diferentes números de masa (simples o en pares), con períodos comprendidos entre los 40 días y los 30 años.

En todos los espectros los picos del par Zr-Nb se presentan particularmente intensos, debido seguramente a la formación de  $^{95}\text{Zr}$  por  $(n, \gamma)$  sobre el zircaloy de la vaina, que se adiciona al producido en fisión.

### 7.11.2. Aplicación de la espectrometría gamma al cálculo de quemado relativo local.

Esto puede realizarse teniendo en cuenta :



Fragmento del espectro de rayos gamma emitidos por una porción central de la barra 23T. La discontinuidad que aparece a partir del pico de Cs-134 se debe a cambio de escala.

FIG. 25

| Nucleído o par<br>genético en<br>equilibrio | Períodos       | Rayos gamma<br>(keV)                                            |
|---------------------------------------------|----------------|-----------------------------------------------------------------|
| $^{144}\text{Ce}$                           | 284 días       | 134 (100%)                                                      |
| $^{144}\text{Pr}$                           | (17,3 minutos) | 696 (1,3%) - 1487                                               |
| $^{134}\text{Cs}$                           | 2,1 años       | 474 (2%)<br>604 (100%)<br>796 (55%)<br>1168 (0,8%)<br>1366 (5%) |
| $^{103}\text{Ru}$                           | 40 días        | 497                                                             |
| $^{106}\text{Ru}$                           | 1 año          |                                                                 |
| $^{106}\text{Rh}$                           | (35 segundos)  | 512 (100%)<br>622 (47%)<br>870<br>1050<br>1120<br>1140<br>1550  |
| $^{137}\text{Cs}$                           | 30 años        |                                                                 |
| $^{137\text{m}}\text{Ba}$                   | (2,6 minutos)  | 662                                                             |
| $^{95}\text{Zr}$                            | 65 días        | 724 (100%)<br>757 (81%)                                         |
| $^{95}\text{Nb}$                            | 35 días        | 766 (100%)                                                      |

Cuando se detecta más de un rayo, los números entre paréntesis dan intensidades relativas aproximadas para el tipo de sistema espectro métrico utilizado(3).

Los períodos entre paréntesis corresponden a nucleído aislado de su precursor.

TABLA 11

- 1) que el período muy largo del  $^{137}\text{Cs}$  hace que este nucleído pueda reflejar el quemado relativo sin ser seriamente afectado por las variaciones de potencia del reactor durante la irradiación.

- 2) que los rendimientos de fisión para el  $^{137}\text{Cs}$  (alrededor de 6%) no varían mucho para fisión de  $^{235}\text{U}$  o de  $^{239}\text{Pu}$ , ni tampoco dependen mucho de la energía de los neutrones.
- 3) que la potencia lineal moderada en las barras de combustible irradiadas en el reactor MZFR no favorece la migración del  $^{137}\text{Cs}$  hacia zonas frías (ver, sin embargo, sección 8.2.).

Para determinar quemado relativo en base a las actividades de  $^{137}\text{Cs}$  registradas en los espectros es necesario relacionar con valores conocidos del grado de quemado.

El cálculo absoluto de quemado depende de muchos factores. Es más exacto y práctico basar el factor de conversión en una calibración radioquímica. En el caso del EC Prototipo I se dispone de buenas determinaciones radioquímicas del quemado (ver sección 8.2.). Por lo tanto, es posible verificar si las mediciones de actividad del  $^{137}\text{Cs}$  guardan paralelismo con las determinaciones de grado de quemado, a condición de que ambas mediciones se realicen, en cada caso, sobre un mismo fragmento o porción de la barra de combustible. Si efectivamente se verifica proporcionalidad, puede tomarse la medición radioquímica como base para establecer un factor de equivalencia entre actividad de  $^{137}\text{Cs}$  y quemado relativo.

En la Fig.26 se representan esquemáticamente cinco de las seis barras sometidas a espectrometría gamma y a determinación radioquímica de quemado; de la barra 24 T no se tomaron espectros y por eso no está incluida.

En el gráfico puede verse que las posiciones aprovechadas para espectrometría (señaladas con E) no coinciden con las posiciones de los cortes utilizados para análisis radioquímicos (señalados con Q). Sin embargo, suponiendo que existe por lo menos una proporcionalidad grosera entre la actividad de  $^{137}\text{Cs}$  ( $A_{\text{Cs}}$ ) y el quemado relativo, puede establecerse un factor de corrección (transposición) para cada  $A_{\text{Cs}}$  del espectro, a fin de referirla a la ubicación de la muestra analítica más próxima. Esto puede hacerse relacionando las actividades en un scan (a 400-1700 keV, o bien a 638-684 keV) para las posiciones E por un lado, y para las posiciones Q de las muestras analíticas más cercanas a aquellas, por el otro. Los datos obtenidos del scan 400-1700 keV tienen mejor precisión estadística.

En la Fig.26 se subrayan las letras E y Q que corresponden a las posiciones utilizadas para los cálculos. Los factores de transposición hallados, f, figuran en la Tabla 12.

El procedimiento para hallar la actividad de  $^{137}\text{Cs}$  en cada espectro consiste en:

- 1) localizar el pico de  $^{137}\text{Cs}$  -  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  por su energía de 662 keV, utilizando para ello la correspondiente recta de calibración en energía.
- 2) establecer qué canales cubre el pico (generalmente se halló que eran los comprendidos entre canales 130 y 135 inclusive).
- 3) sumar los valores de actividad en esos canales según los datos digitales registrados por la teletipo.

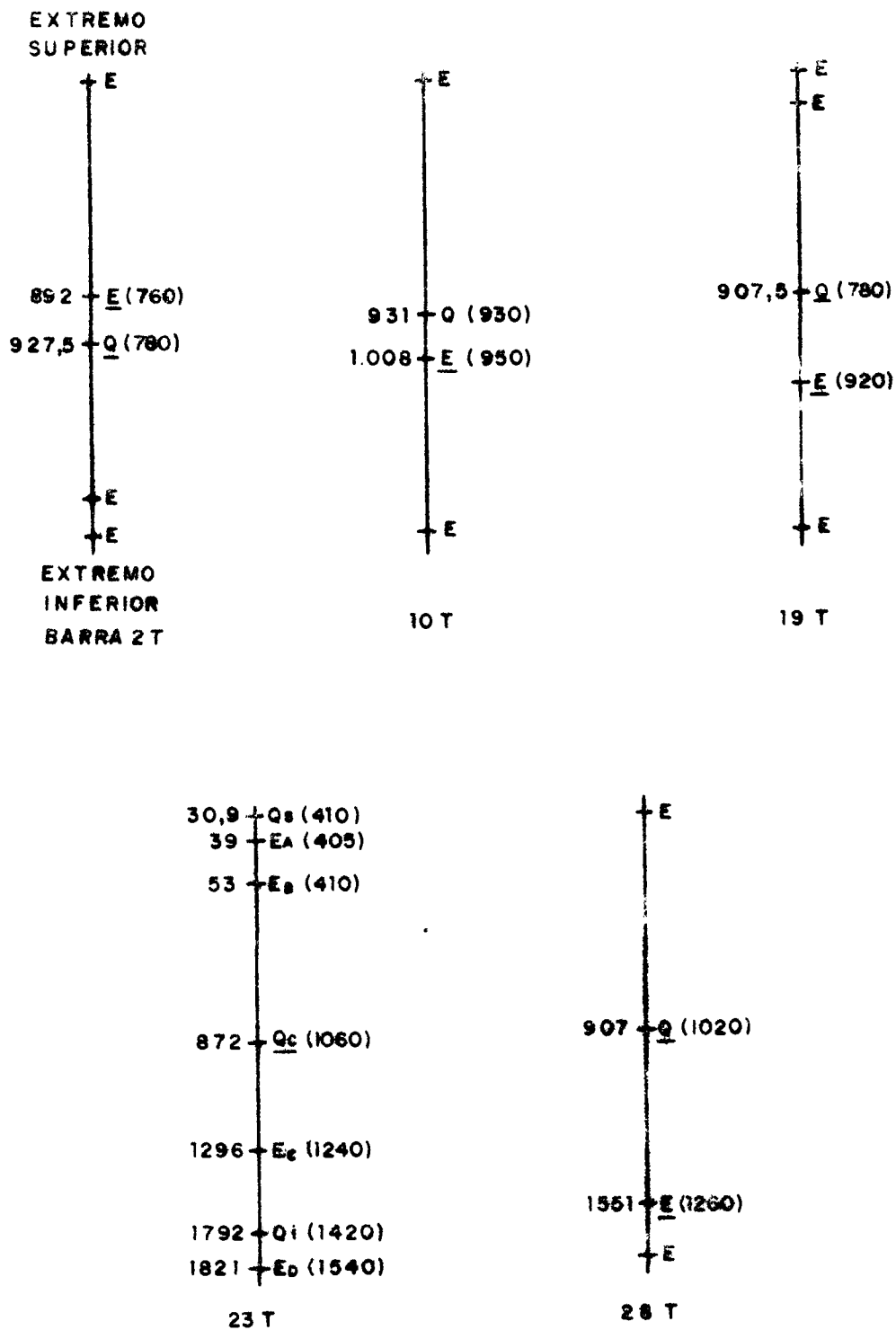


FIG. 26. - Los números a la izquierda de las posiciones dan las distancias desde el extremo superior, en milímetros (esquemático). Los números entre paréntesis denotan actividades netas en los scans 400-1700 keV, en cps.

- 4) restar el "fondo", determinado como se explica en 5).
- 5) en el gráfico de la Fig.27 puede verse que un pico del espectro (barra 2T) obtenido con espectrómetro multicanal es en realidad un histograma, aunque resulta conveniente representarlo como curva continua. La fracción de actividad de fondo puede hallarse determinando el área del trapecio MNPQ.
- 6) ejemplo numérico (espectro B, barra 2 T), sobre el pico de 662 keV del espectro (5 canales).

$$\begin{aligned}
 \text{Actividad medida bruta: } A_b &= A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 = \\
 &= 3769 + 5431 + 14947 + 4077 + 2798 = \\
 &= 31.022 \frac{\text{cuentas}}{20 \text{ minutos}}
 \end{aligned}$$

es decir  $A_b = 1551 \text{ cpm}$ .

$$\text{Fondo} = B = \frac{A_1 + A_5}{2} \times 5 \text{ canales} = 16.415 \text{ cuentas/20 min.} = 821 \text{ cpm.}$$

$$\text{Aneta} = A = A_b - B = 31022 - 16415 = 14.607 \text{ cuentas/20 min.} = 730,4 \text{ cpm.}$$

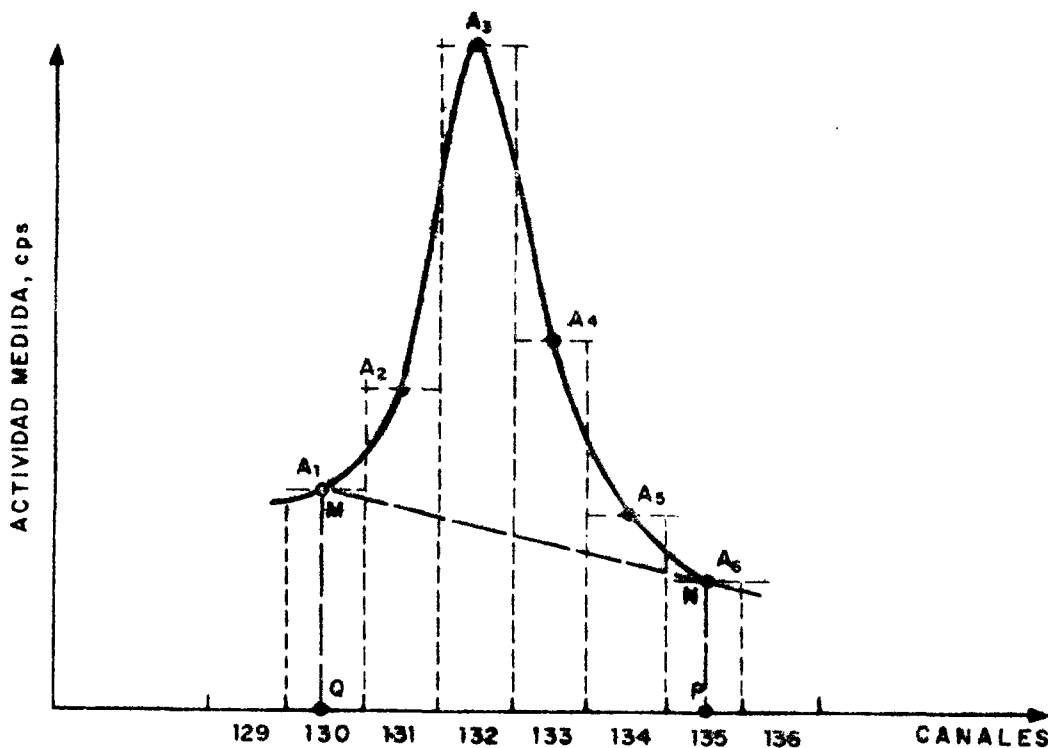


FIG. 27. - Determinación de la actividad neta en un pico de espectro gamma.

En la Tabla 13 figuran los valores netos de actividad de  $^{137}\text{Cs}$ , A, hallados para el espectro E de cada barra, y al lado el producto  $A \times f$ , que transpone a la posición de la muestra Q en cada caso; el valor de actividad así transpuesto se designa  $A_c$ .

La tabla da además la relación  $F/A_c$  entre cada valor de quemado determinado químicamente y el  $A_c$  correspondiente. El promedio de estas relaciones se toma como factor de calibración k, para calcular quemado a partir de datos espectrométricos.

| Muestra     | Actividad medida de $^{137}\text{Cs}$<br>(en cps) |                   | $f = \frac{A_Q}{A_E}$ |
|-------------|---------------------------------------------------|-------------------|-----------------------|
|             | En Q<br>( $A_Q$ )                                 | En E<br>( $A_E$ ) |                       |
| 23 T sup.   | 410                                               | 410               | 1,000                 |
| 2 T         | 760                                               | 740               | 1,027                 |
| 10 T        | 930                                               | 950               | 0,979                 |
| 19 T        | 780                                               | 920               | 0,848                 |
| 23 T centr. | 1060                                              | 1240              | 0,855                 |
| 28 T        | 1020                                              | 1260              | 0,810                 |
| 23 T inf.   | 1420                                              | 1540              | 0,921                 |

TABLA 12

| Muestra     | Actividad de $^{137}\text{Cs}$ en espectro (cpm) | f     | $A_c = A \times f$<br>( $\times 10^4$ ) | Quemado por análisis químico F (*) | $F/A_c$<br>( $\times 10^{-4}$ ) |
|-------------|--------------------------------------------------|-------|-----------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| 23 T Sup.   | 399,0                                            | 1,000 | 399,0                                   | 0,301                              | 7,54                            |
| 2 T         | 730,4                                            | 1,027 | 750,1                                   | 0,502                              | 6,69                            |
| 10 T        | 848,3                                            | 0,979 | 830,5                                   | 0,561                              | 6,75                            |
| 19 T        | 951,3                                            | 0,848 | 806,7                                   | 0,522                              | 6,47                            |
| 23 T centr. | 1054,1                                           | 0,855 | 898,1                                   | 0,597                              | 6,65                            |
| 28 T        | 1206,3                                           | 0,810 | 977,1                                   | 0,611                              | 6,25                            |
| 23 T inf.   | 1376,7                                           | 0,921 | 1267,9                                  | 0,908                              | 7,16                            |
|             |                                                  |       |                                         | Promedio                           | 6,737                           |
|             |                                                  |       |                                         | D.S.                               | 0,433                           |
|             |                                                  |       |                                         | D.S.relat.                         | 6,4%                            |

(\*) método del neodimio

TABLA 13

El factor de calibración  $k$ , basado en los datos químicos de quemado obtenidos por el método del neodimio, resulta, por lo tanto

$$k = 6,787 \times 10^{-4} \text{ FIMA/ cpm.}$$

FIMA = quemado, en fisiones por átomo fisionable y/o fértil inicial.

### 7.11.3. Discusión

El factor anterior permite calcular el quemado relativo en un punto de una barra combustible determinando la actividad de  $^{137}\text{Cs}$  en un espectro de la actividad gamma emitida, para las condiciones particulares de medición utilizadas en el laboratorio de celdas calientes del KFK.

La imprecisión de 6,4% no es excesiva, para el método aplicado.

Hay que notar, por otra parte, que la concordancia entre los valores individuales del cociente  $F/Ac$  mejora mucho cuando se excluye a los que corresponden a las muestras en los extremos de la barra 23 T, donde el flujo neutrónico puede diferir apreciablemente en distribución energética.

Si se ignoran las muestras 23 T sup. y 23 T inf., en efecto, el promedio de los cocientes  $F/Ac$  resulta igual a  $6,562 \times 10^{-4}$ , con desviación standard relativa de 3,1%.

El procedimiento puede ser aplicado a determinaciones locales de quemado, en base a determinaciones espectrométricas en pileta de maniobras de una central nuclear, y podría servir, por ejemplo, en las Centrales Nucleares de Atucha y de Río Tercero.

## 8. ENSAYOS DESTRUCTIVOS

### 8.1. Determinación de gases de fisión

La determinación de gases de fisión se realizó sobre las barras 2 T, 10 T y 23 T. Esta consistió en la medición de criptón y xenón en las formas gas libre, gas ocluido en poros y gas disuelto en la red cristalina.

El criptón y el xenón fueron determinados por cromatografía sólido-gas; no se determinaron otros gases (óxidos de carbono, hidrógeno, vapor de agua, etc.) que pueden contribuir a la presión en el interior de la barra en condiciones de operación del reactor.

El cromatógrafo utilizado posee dos detectores, uno de conductividad térmica que

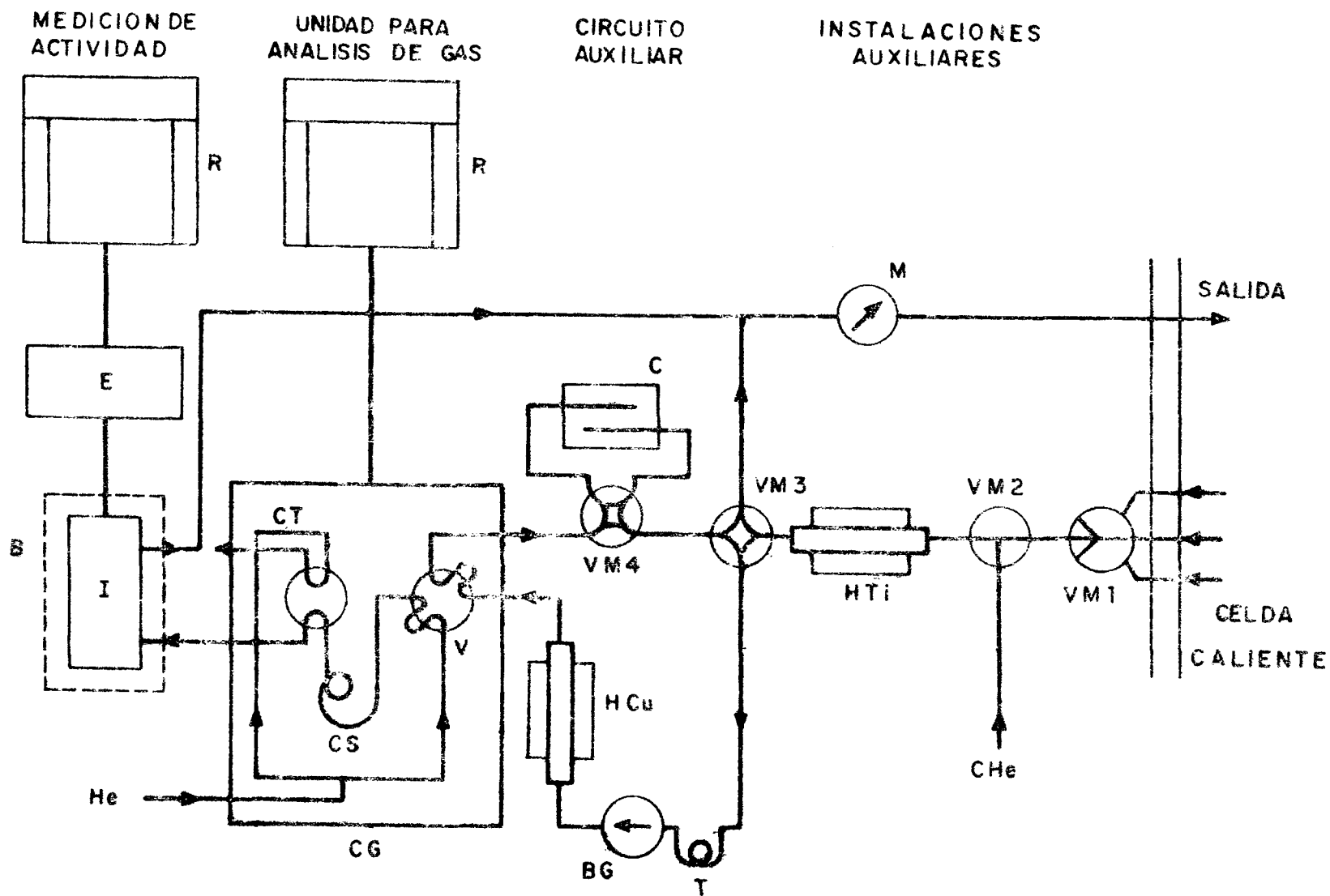
es sensible a ambos gases y otro de radioactividad que produce un pico para criptón-85. Los gases de fisión, liberados en forma adecuada para cada caso, son arrastrados con helio y retenidos en una trampa rellena con gel de sílice mantenida a temperatura de nitrógeno líquido. Una vez que los gases han sido transferidos cuantitativamente a la trampa fría, se los libera dentro de un volumen conocido elevando la temperatura de la trampa fría. El análisis se realiza sobre una alícuota de este volumen que se obtiene mediante una válvula rotatoria calibrada convenientemente. El cromatógrafo y el sistema de colección (que incluye además etapas de purificación para eliminar oxígeno, hidrógeno, hidrocarburos, etc.) están ubicados en el exterior de la celda caliente. En la Fig.28 se muestra un esquema del sistema.

La etapa de liberación de los gases se realiza en el interior de la celda y difiere según que se trate de gas libre ocluido o disuelto. Para la determinación de gas libre una parte de la barra se aisla del exterior mediante un dispositivo estanco de forma anular y se la perfora en condiciones de presión reducida. Los gases liberados se expanden en el interior del dispositivo y son transferidos al sistema de colección con una corriente de helio. Para la determinación de gas ocluido en los poros una muestra pesada de óxido de uranio se muele en una cápsula evacuada de acero inoxidable, la que luego se abre en un dispositivo estanco conectado al sistema de colección. Como antes, los gases de fisión liberados son transferidos al sistema de colección con una corriente de helio. Finalmente, el gas disuelto en la red cristalina se determina por disolución a reflujo en ácido nítrico diluido de una porción de polvo de óxido de uranio proveniente de la operación anterior. Los gases desprendidos son arrastrados con helio. Un tren de purificación y desecación impide la entrada de óxido de nitrógeno y vapor de agua al sistema de colección.

La presión parcial ejercida por los gases libres de fisión se obtiene por cálculo. Para ello se determina en forma independiente el volumen de la barra combustible mediante un procedimiento barométrico basado en la ecuación de los gases ideales.

Los datos experimentales están consignados en la Tabla 14 y los resultados calculados en las Tablas 15 y 16. Los valores para contenido de gases dados en la Tabla 14 muestran para las barras 2 T y 10 T resultados compatibles con los valores de quemado relativo; los valores para la barra 23 T parecen incompatibles con los anteriores y con su quemado relativo. Esto podría deberse a un error en la determinación de gas disuelto en esta última barra.

Los valores de actividad específica y actividad total están consignados en la Tabla 17. La actividad específica promedio de criptón -85 para las tres barras analizadas resulta ser de  $120 \pm 14 \mu\text{Ci/mm}^3$  (correctada por el tiempo de enfriamiento desde el 31-8-71 hasta el momento del análisis). Sobre la actividad total de cada una de las barras se pueden hacer exactamente los mismos comentarios que en el párrafo anterior.



Ver explicación de símbolos en página 49.

FIG. 28

Fig.28. - Diagrama esquemático de la instalación de medición de gases

|                                    |   |                                              |
|------------------------------------|---|----------------------------------------------|
| B                                  | = | Blindaje                                     |
| CG                                 | = | Cromatógrafo de gases                        |
| C                                  | = | Cámara de expansión                          |
| E                                  | = | Electrómetro                                 |
| He                                 | = | Entrada de gas de arrastre (He)              |
| I                                  | = | Cámara de ionización                         |
| R <sub>1</sub> R <sub>2</sub>      | = | Registradores gráficos de tensión            |
| BG                                 | = | Bomba de gases                               |
| V                                  | = | Válvula de muestreo                          |
| HCu                                | = | Horno de purificación (CuO)                  |
| T                                  | = | Trampa fría de adsorción (SiO <sub>2</sub> ) |
| HTi                                | = | Horno de purificación a lecho de titanio     |
| CS                                 | = | Columna de separación                        |
| GHe                                | = | Conexión para el helio de lavado             |
| M                                  | = | Medidor de gas                               |
| VM <sub>1</sub><br>VM <sub>2</sub> | = | Válvulas de conexión múltiple                |
| CT                                 | = | Celda de conductividad térmica               |

TABLA 14

Datos experimentales para el cálculo de gases de fisión  
en barras combustibles del Prototipo CNEA-MZFR-I

|                                 |                           | 2 T   | 10 T | 23 T  |
|---------------------------------|---------------------------|-------|------|-------|
| Gas libre                       | Xe ( $\text{mm}^3$ )      | 63,5  | 55,3 | 106,5 |
|                                 | Kr ( $\text{mm}^3$ )      | 9,5   | 9,3  | 12,9  |
|                                 | Kr-85 ( $\mu\text{Ci}$ )* | 840   | 805  | 1140  |
| Gas en poros                    | Xe ( $\text{mm}^3$ )      | 112,0 | 52,5 | 54,9  |
|                                 | Kr ( $\text{mm}^3$ )      | 10,7  | 16,5 | 16,2  |
|                                 | Kr-85 ( $\mu\text{Ci}$ )* | 1160  | 1630 | 1680  |
|                                 | Peso de muestra (g)       | 7,78  | 8,54 | 9,13  |
| Gas en red                      | Xe ( $\text{mm}^3$ )      | 696   | 515  | 516   |
|                                 | Kr ( $\text{mm}^3$ )      | 74,1  | 49,6 | 53,6  |
|                                 | Kr-85 ( $\mu\text{Ci}$ )* | 8100  | 4750 | 6700  |
|                                 | Peso de muestra (g)       | 7,03  | 3,36 | 6,23  |
| Volumen libre ( $\text{mm}^3$ ) |                           | 8307  | 8294 | 8376  |

\* Valores obtenidos en mayo-junio 1972, no corregidos por decaimiento.

TABLA 15

Gases de fisión en barras combustibles del Prototipo  
CNEA-MZFR-I

|                                                    | 2 T    |        | 10 T   |        | 23 T   |        |
|----------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                                    | Kr     | Xe     | Kr     | Xe     | Kr     | Xe     |
| 1. Gas libre (cm <sup>3</sup> )                    | 0,0095 | 0,0635 | 0,0093 | 0,0553 | 0,0129 | 0,106  |
| 2. Gas poros (mm <sup>3</sup> /gUO <sub>2</sub> )  | 1,39   | 14,4   | 1,93   | 6,15   | 1,77   | 6,02   |
| 3. Gas poros total (cm <sup>3</sup> )              | 2,23   | 23,0   | 3,03   | 9,73   | 2,84   | 9,48   |
| 4. Gas en red (mm <sup>3</sup> /gUO <sub>2</sub> ) | 10,6   | 99,0   | 14,7   | 138    | 8,61*  | 82,9*  |
| 5. Gas red total (cm <sup>3</sup> )                | 16,9   | 157    | 23,4   | 220    | 13,6*  | 131*   |
| 6. Gas total (1+3+5) (cm <sup>3</sup> )            | 19,1   | 180    | 26,4   | 230    | 16,5*  | 141*   |
| 7. Gas libre %                                     | 0,048  | 0,035  | 0,035  | 0,024  | 0,078* | 0,075* |
| 8. (Kr+Xe) total (cm <sup>3</sup> )                | 199    |        | 256    |        | 158*   |        |
| 9. Rel. Kr <sub>Tot</sub> /Xe <sub>Tot</sub>       | 1/9,4  |        | 1/8,7  |        | 1/8,5  |        |
| 10. Presión parcial del gas libre (atm) a °C       | 0,0088 |        | 0,0077 |        | 0,014  |        |

(\*) Valores considerados poco confiables (Ver texto)

TABLA 16

Actividad de Kr-85 en barras combustibles  
(medido mayo-junio 1972; corregido a 31-8-71)

|              |                                           | 2 T                | 10 T               | 23 T                |
|--------------|-------------------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| Gas libre    | Act. Especif., $\mu\text{Ci}/\text{mm}^3$ | 99                 | 97                 | 101                 |
|              | Gas total, $\text{mm}^3$                  | 9,5                | 9,3                | 12,9                |
|              | Act. total, Ci                            | 942                | 903                | 1280                |
| Gas en poros | Act. Especif., $\mu\text{Ci}/\text{mm}^3$ | 123                | 112                | 118                 |
|              | Gas total, $\text{mm}^3$                  | 2230               | 3030               | 2840                |
|              | Act. total, Ci                            | $2,74 \times 10^5$ | $3,41 \times 10^5$ | $3,35 \times 10^5$  |
| Gas en red   | Act. Especif., $\mu\text{Ci}/\text{mm}^3$ | 124                | 109                | 142                 |
|              | Gas total, $\text{mm}^3$                  | 16900              | 23400              | 13600 *             |
|              | Act. total, Ci                            | $2,09 \times 10^6$ | $2,56 \times 10^6$ | $1,93 \times 10^6*$ |
| Gas total    | Act. Especif., $\mu\text{Ci}/\text{mm}^3$ | 123                | 110                | 137                 |
|              | Act. total, $\mu\text{Ci}$                | $2,36 \times 10^6$ | $2,90 \times 10^6$ | $2,27 \times 10^6*$ |

(\*) Valores considerados poco confiables (Ver texto)

## 8.2. Determinación de quemado relativo

### 8.2.1. Técnicas. Resultados

La determinación de quemado relativo ("burnup") (\*) fue realizada sobre seis barras combustibles (2T, 10T, 19T, 23T, 24T y 28T) pertenecientes al sector descripto anteriormente. En la barra 23T se realizaron determinaciones sobre tres muestras denominadas 2, 5 y 8. La ubicación de las muestras está ilustrada en la figura 26.

Las determinaciones se realizaron por cuatro métodos independientes, basados, respectivamente, en la medición de un producto de fisión estable,  $^{148}\text{Nd}$ ; en la determinación de la composición isotópica del uranio y el plutonio después de la irradiación y en la medición de dos productos de fisión radioactivos,  $^{144}\text{Ce}$  y  $^{137}\text{Cs}$ . Es necesario hacer notar que estos métodos tienen niveles de confianza muy diferentes entre sí y que, si bien la coincidencia entre resultados confirma su validez, el criterio de promediarlos (aún usando factores de peso estadístico), es discutible. Los resultados obtenidos por KFK están consignados en las Tablas 17, 18, 19 y 20.

El método basado en la medición de la cantidad de  $^{148}\text{Nd}$  por espectrometría de masa previa separación por intercambio iónico y/o cromatografía líquido-líquido, es el que se reconoce como capaz de dar resultados más exactos (3). Tiene la ventaja de basarse en la determinación de un producto de fisión estable y de emplear en el cálculo una constante (rendimiento de fisión) que está bien establecida para neutrones térmicos.

El método basado en la medición de las relaciones isotópicas tiene el inconveniente de ser un método indirecto que requiere cálculos que incluyen parámetros nucleares, tales como relaciones de fisión a captura y secciones eficaces de absorción, que dependen fuertemente del espectro neutrónico. Hay además aproximaciones que disminuyen la exactitud de los cálculos. Este método es de poca confiabilidad y de baja precisión.

Los métodos basados en la medición de productos de fisión radioactivos son más confiables que el anterior. El procedimiento utilizado, basado en la medición de actividad de estos nucleídos por espectrometría gamma sin previa separación tiende a reducir la precisión y exactitud del método. Por otra parte, el período de semidesintegración del  $^{144}\text{Ce}$  es demasiado corto para usarlo como indicador de quemado en irradiaciones largas y el  $^{137}\text{Ce}$  tiene precursores volátiles y es capaz de migrar dentro del combustible.

Los datos que se han recibido son insuficientes como para hacer una evaluación estadística de los resultados obtenidos por cada uno de los métodos individuales.

---

(\*) El quemado relativo está expresado en fisiones por átomos de metales pesados iniciales (FIMA), excepto en Tabla 20, tercera columna, y en las Figs. 29, 30 y 31.

TABLA 17

Composición isotópica del neodimio de fisión  
(Sept.- Oct. 1972)

| Muestra<br>N° | Números de masa; valores R |       |       |       |       |        |
|---------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|
|               | 143                        | 144   | 145   | 146   | 148   | 150    |
| 2 T           | 2,641                      | 2,237 | 2,009 | 1,694 | 1,000 | 0,4466 |
| 10 T          | 2,665                      | 2,238 | 1,997 | 1,681 | 1,000 | 0,4447 |
| 19 T          | 2,702                      | 2,219 | 2,028 | 1,696 | 1,000 | 0,4458 |
| 23 T-2        | 2,247                      | 2,417 | 1,879 | 1,666 | 1,000 | 0,4508 |
| 23 T-5        | 2,597                      | 2,324 | 1,997 | 1,697 | 1,000 | 0,4451 |
| 23 T-8        | 3,101                      | 2,175 | 2,184 | 1,735 | 1,000 | 0,4248 |
| 24 T          | 2,564                      | 2,347 | 1,979 | 1,684 | 1,000 | 0,4430 |
| 28 T (*)      | 2,553                      | 2,339 | 1,984 | 1,688 | 1,000 | 0,4464 |

$$R = \frac{\text{Masa Nd} - n}{\text{Masa Nd}-148} \quad ; \quad n = 143, 144, \dots, 150.$$

(\*) Fecha de Medición 18-11-1972

TABLA 18

Concentraciones de uranio, plutonio y productos de fisión

| Muestra<br>N° | Atomos/g solución      |                       |                        | mCi/g solución<br>(7-6-1971)* |        |
|---------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------------|--------|
|               | U                      | Pu                    | Nd-148                 | Ce-144                        | Cs-137 |
| 2T            | $2,901 \times 10^{20}$ | $6,55 \times 10^{17}$ | $2,514 \times 10^{16}$ | 60,3                          | 1,83   |
| 10 T          | $2,534 \times 10^{20}$ | $5,87 \times 10^{17}$ | $2,457 \times 10^{16}$ | 44,4                          | 1,60   |
| 19 T          | $2,175 \times 10^{20}$ | $5,42 \times 10^{17}$ | $1,957 \times 10^{16}$ | 39,5                          | 1,33   |
| 23 T-2        | $2,223 \times 10^{20}$ | $7,07 \times 10^{17}$ | $3,511 \times 10^{16}$ | 65,4                          | 2,50   |
| 23 T-5        | $2,548 \times 10^{20}$ | $6,36 \times 10^{17}$ | $2,630 \times 10^{16}$ | 51,5                          | 1,88   |
| 23 T-8        | $1,602 \times 10^{20}$ | $2,60 \times 10^{17}$ | $0,829 \times 10^{16}$ | 15,6                          | 0,588  |
| 24 T          | $1,707 \times 10^{20}$ | $4,94 \times 10^{17}$ | $1,810 \times 10^{16}$ | 36,1                          | 1,33   |
| 28 T          | $1,863 \times 10^{20}$ | $5,00 \times 10^{17}$ | $1,970 \times 10^{16}$ | 38,2                          | 1,34   |

(\*) Fecha del patrón de calibración.

TABLA 19

Quemado relativo (átomos %)

| Muestra<br>N° | M é t o d o s     |                           |                   |                   |
|---------------|-------------------|---------------------------|-------------------|-------------------|
|               | $^{148}\text{Nd}$ | Relac. isotópicas<br>U/Pu | $^{144}\text{Ce}$ | $^{137}\text{Cs}$ |
| 2 T           | 0,502             | 0,503                     | 0,493             | 0,489             |
| 10 T          | 0,561             | 0,509                     | 0,510             | 0,517             |
| 19 T          | 0,522             | 0,543                     | 0,530             | 0,482             |
| 23 T-2        | 0,908             | 0,869                     | 0,881             | 0,860             |
| 23 T-5        | 0,597             | 0,611                     | 0,593             | 0,582             |
| 23 T-8        | 0,301             | 0,287                     | 0,284             | 0,291             |
| 24 T          | 0,613             | 0,653                     | 0,620             | 0,613             |
| 28 T          | 0,611             | 0,626                     | 0,601             | 0,567             |

TABLA 20

Quemado relativo F (valor medio ponderado)  
y contenido de plutonio

| Muestra<br>N° | F <sub>t</sub> (Atomos %) | F <sub>t</sub> MWd/ton | Relación de átomos<br>Pu : U |
|---------------|---------------------------|------------------------|------------------------------|
| 2 T           | 0,497                     | 4700                   | $2,257 \times 10^{-3}$       |
| 10 T          | 0,534                     | 5050                   | $2,316 \times 10^{-3}$       |
| 19 T          | 0,517                     | 4890                   | $2,491 \times 10^{-3}$       |
| 23 T-2        | 0,887                     | 8380                   | $3,180 \times 10^{-3}$       |
| 23 T-5        | 0,594                     | 5620                   | $2,496 \times 10^{-3}$       |
| 23 T-8        | 0,293                     | 2770                   | $1,622 \times 10^{-3}$       |
| 24 T          | 0,619                     | 5850                   | $2,893 \times 10^{-3}$       |
| 28 T          | 0,600                     | 5680                   | $2,684 \times 10^{-3}$       |

Se han calculado los pesos estadísticos utilizados para realizar los "promedios pesados" entre los cuatro métodos. Este cálculo se ha hecho estableciendo sistemas de ecuaciones con los datos individuales y los datos de los promedios correspondientes y resolviendo grupos de sistemas de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas. Debido a los redondeos de datos los factores de peso estadístico así obtenidos debieron ser ajustados por aproximaciones sucesivas. Los valores más probables, cuya aplicación conduce a resultados que coinciden dentro de  $\pm 0,1\%$ , se encuentran en la Tabla 21. Los factores de peso estadístico utilizados dan pues mayor importancia a los datos obtenidos por el método más confiable y menor a los menos confiables. Sin embargo, los datos de resultados obtenidos por los métodos de  $^{144}\text{Ce}$  y  $^{137}\text{Ce}$  resultan sistemáticamente más bajos que los datos obtenidos por los otros procedimientos, como se puede observar si se normalizan todos los datos al de  $^{148}\text{Nd}$ . Estos resultados están consignados en la Tabla 22; en esta tabla se han calculado además promedios y desviaciones tipo para cada uno. Los datos de la tabla muestran que para el método basado en  $^{137}\text{Cs}$  los resultados son más bajos que por el método del  $^{148}\text{Nd}$  en todas las muestras, salvo en una (24 T) en que el resultado es el mismo.

TABLA 21

Factores de peso estadístico para promediar resultados  
de determinación de quemado relativo

| METODO                              | FACTOR |
|-------------------------------------|--------|
| Determinación del $^{148}\text{Nd}$ | 2,0    |
| Relación isotópica                  | 0,3    |
| Determinación de $^{144}\text{Ce}$  | 0,7    |
| Determinación de $^{137}\text{Ce}$  | 1,0    |

TABLA 22

Datos de quemado relativo normalizados  
al dato obtenido por determinación de  $^{148}\text{Nd}$

| METODO DE ANALISIS           |             |                   |                   |
|------------------------------|-------------|-------------------|-------------------|
| Muestra                      | Comp. Isot. | $^{144}\text{Ce}$ | $^{137}\text{Cs}$ |
| 2 T                          | 1,001       | 0,982             | 0,974             |
| 10 T                         | 0,907       | 0,909             | 0,921             |
| 19 T                         | 1,040       | 1,015             | 0,923             |
| 23 T-2                       | 0,957       | 0,970             | 0,947             |
| 23 T-5                       | 1,023       | 0,993             | 0,974             |
| 23 T-8                       | 0,953       | 0,943             | 0,966             |
| 24 T                         | 1,065       | 1,011             | 1,000             |
| 28 T                         | 1,024       | 0,983             | 0,927             |
| Promedio                     | 0,996       | 0,975             | 0,954             |
| Desv. Tipo                   | $\pm 0,053$ | $\pm 0,035$       | $\pm 0,029$       |
| Método por $^{148}\text{Nd}$ | = 1,000     |                   |                   |

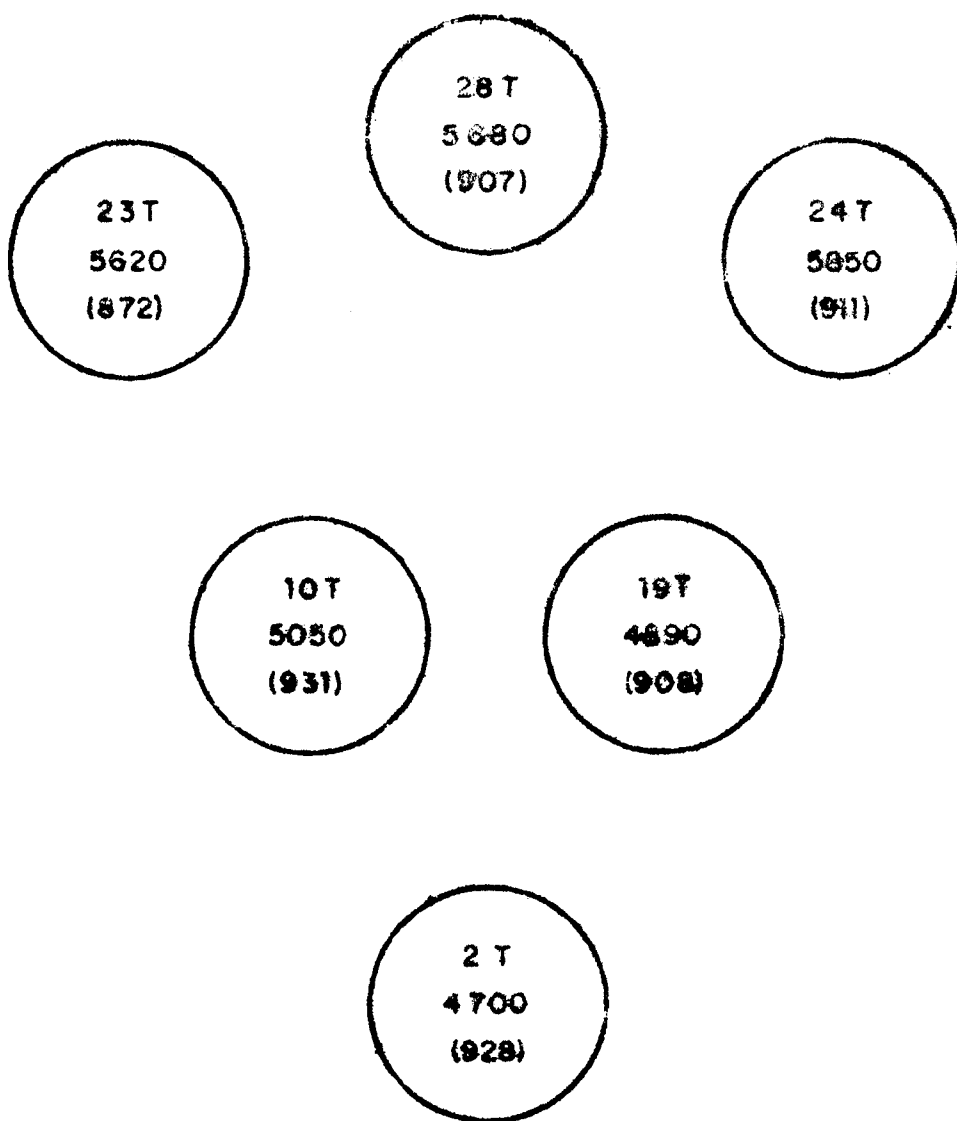


FIG. 29. - Distribución no corregida de quemados relativos en las muestras "centrales" de las diferentes barras, en MWd/ton. Entre paréntesis: distancia media de la muestra desde el extremo superior de la barra respectiva, en mm. Ver Fig.31.

La divergencia sistemática entre los valores de quemado relativo obtenidos por el método del neodimio y del cesio podría también demostrarse por métodos de estadística no paramétrica(4). De acuerdo a esto, debido a que sobre ocho casos se obtienen diferencias de un mismo signo entre ambos, la probabilidad de una desviación sistemática entre ambos métodos es del 90%(5). Esto es compatible con que el cesio migra en el elemento combustible de regiones más calientes a más frías y demostraría que para este combustible el  $^{137}\text{Cs}$  es un indicador de fisión menos adecuado que los otros dos. El peso estadístico asignado a este dato parecería, por lo tanto, demasiado alto. En consecuencia se han recalculado datos promedio descartando los valores correspondientes a las determinaciones por  $^{137}\text{Cs}$ . utilizando factores de peso estadístico 2,0; 0,3 y 0,7 para los métodos

por  $^{148}\text{Nd}$ , composición isotópica  $^{144}\text{Ce}$ , respectivamente. Estos resultados se consignan en la Tabla 23. En promedio, estos datos resultan aproximadamente 1% más altos que los promedios calculados teniendo en cuenta los datos obtenidos por  $^{137}\text{Cs}$ .

TABLA 23

Valores de quemado relativo (promedio pesado)  
calculados descartando los datos de  $^{137}\text{Cs}$

| Muestra | Quemado relativo<br>(átomos %) |
|---------|--------------------------------|
| 2 T     | 0,500                          |
| 10 T    | 0,544                          |
| 19 T    | 0,526                          |
| 23 T-2  | 0,898                          |
| 23 T-5  | 0,598                          |
| 23 T-8  | 0,296                          |
| 24 T    | 0,618                          |
| 28 T    | 0,612                          |

#### 8.2.2. Distribución de quemado en el elemento combustible

Cualitativamente los valores son compatibles con lo esperado; es decir, las barras de la periferia tienen mayor quemado que las de la segunda fila y éstas a su vez mayor quemado que la barra de la tercera fila. Cuantitativamente, tomando los datos de la tabla 19, las barras de la primera fila (23 T, 24T, 28T) tienen en promedio un quemado relativo de 0.608 at%, las de la segunda (10T, 19T) 0,535 at% y la de la tercera fila (2 T) 0,500 átomos%, es decir, tomando 2T como 1,00, resulta para la segunda fila 1,07 y para la primera fila 1,22.

La comparación entre los grados de quemado en las barras del sector examinado puede en principio realizarse sobre la base de que las muestras analizadas corresponden a posiciones centrales, aproximadamente homólogas. Con este criterio se ha dibujado el diagrama de la Fig. 29, en que se consigna el quemado "central" hallado para cada barra, en MWd/ton.

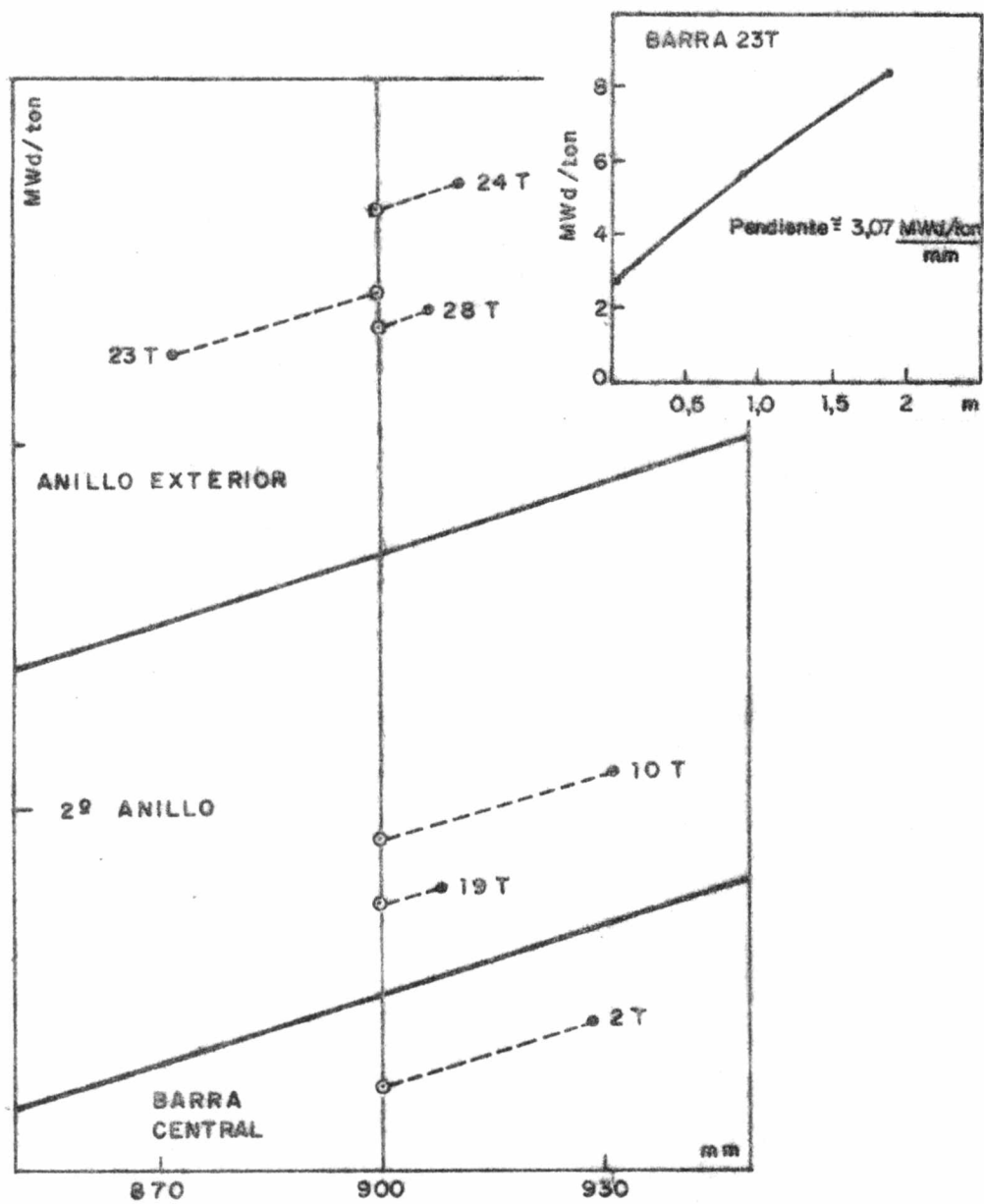


FIG. 30.

Las diferencias entre los valores de quemado en las barras de un mismo anillo se pueden explicar por diferencia de flujo neutrónico y/o distribución de  $\text{UO}_2$ , es decir, diferencia intrínseca entre posiciones homólogas, o bien por diferencia entre ubicaciones relativas de las muestras analizadas, que están dadas por su distancia media al extremo superior, en cada caso.

Como las muestras fueron en realidad tomadas a distancias algo diferentes entre sí respecto del extremo superior respectivo es de esperar que los quemados medidos difieran (aunque correspondan a barras de un mismo anillo, como efectivamente sucede) aún en el caso de que el quemado intrínseco para posiciones homólogas sea el mismo.

Por esta razón, los valores de quemado de la Fig.29 no deben tomarse como indicación de diferencias intrínsecas solamente.

Un gráfico que muestre el valor del grado de quemado de las muestras centrales en función de su distancia respectiva al extremo superior de la barra permite una visión más aproximada de la distribución real (Fig. 30 b); las distancias al extremo se dan en la Fig.26, excepto para la barra 24 T; la muestra central de esta barra se encontraba a una distancia media de 911 mm del extremo superior.

Los puntos del gráfico Fig. 30 b se pueden agrupar en tres zonas que corresponden a los anillos de barras en el EC. Su disposición sugiere el sentido y magnitud del quemado relativo con la posición de la muestra sobre la barra respectiva. Aprovechando esta sugerencia se puede normalizar refiriendo todos los datos a una misma ubicación en todas las barras, por ejemplo 900 mm. desde el extremo superior.

A ese efecto, la pendiente del valor de quemado con la distancia se ha obtenido a partir de las tres determinaciones en la barra 23 T, como se representa en la Fig. 30 a; de ella se deduce una pendiente aproximada de 3,07 MWd/ton.mm.

Esta normalización está indicada en el gráfico; puede observarse que como consecuencia de ella resulta alterado el orden de magnitud de quemado en las barras del anillo exterior; la nueva distribución de quemado en las barras se representa en la Fig.31.

### 8.2.3. Fuentes de quemado y producción de plutonio.

En la Tabla 24 se han calculado las contribuciones individuales de los diferentes nucleídos de átomos pesados al quemado total. Estos han sido calculados a partir de las variaciones de composición isotópica de la muestra antes y después de irradiada. En todos los casos la contribución principal es debida a  $^{235}\text{U}$  y  $^{239}\text{Pu}$  que suman por lo menos el 90%. La contribución del  $^{238}\text{U}$  por fisión rápida es independiente del grado de quemado y del orden de 8%. La contribución del  $^{239}\text{Pu}$  y el  $^{241}\text{Pu}$  aumenta con el aumento del quemado y llega a aproximadamente 40% para la muestra con quemado más alto (aprox. 0,89 átomos %). Con los datos se ha construido el gráfico de la Fig. 32.

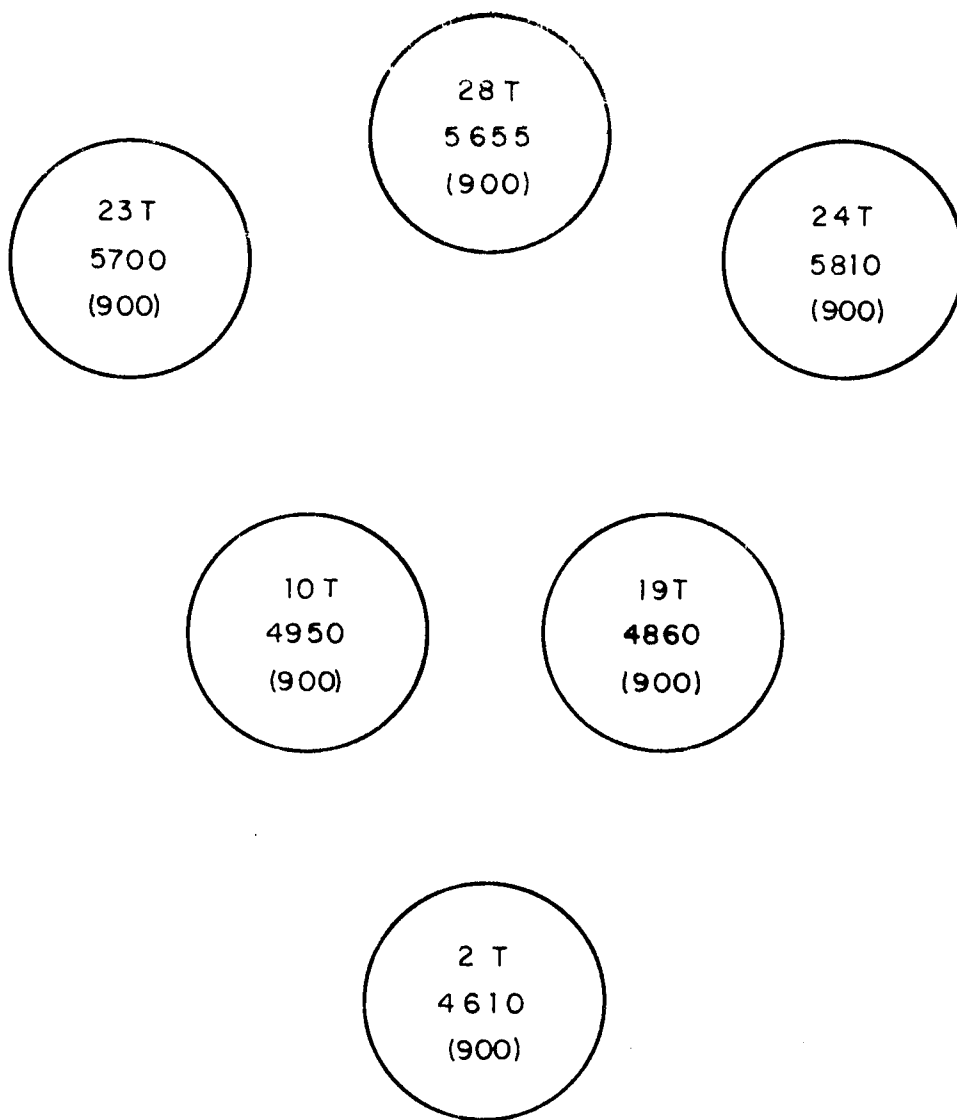


FIG. 31. - Normalización de los datos de la Fig.29, según las conclusiones obtenidas de la Fig.30. Las cifras dentro de los círculos dan quemado relativo en Mwd/ton.

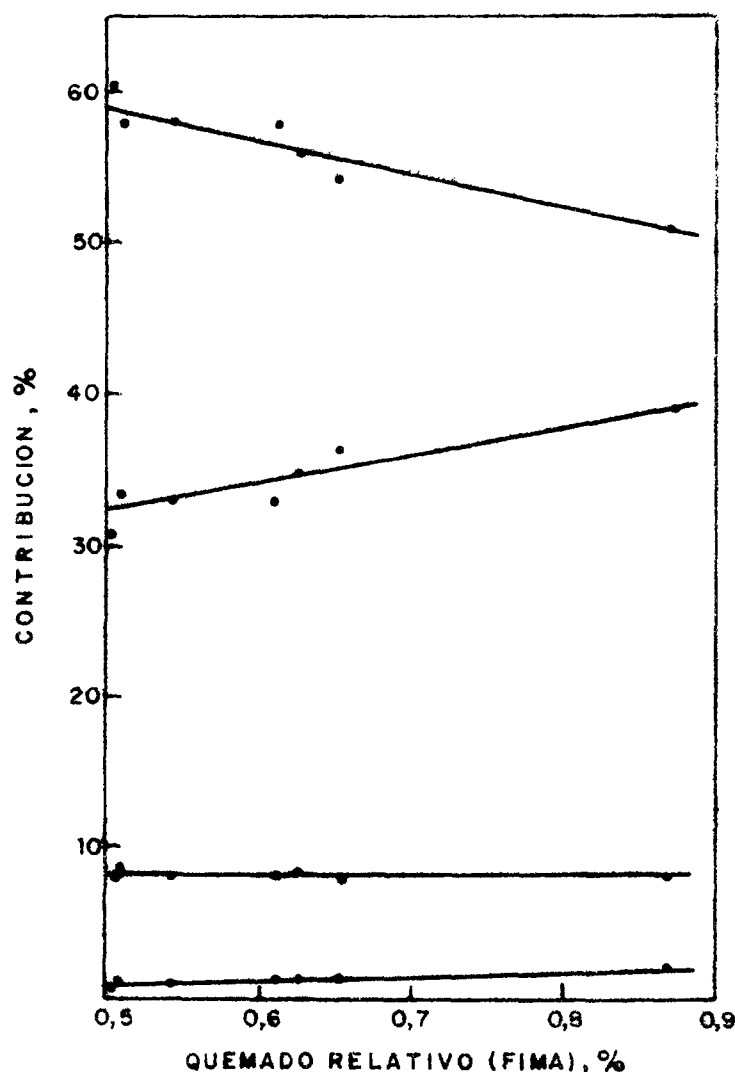


FIG. 32.

La producción de plutonio aumenta con el quemado (aunque no en forma lineal, debido al aumento número de fisiones del plutonio). El contenido final de plutonio total es del orden de 0,2 a 0,3% en peso según el quemado de las distintas barras. La composición isotópica varía también con el grado de quemado con disminución relativa del  $^{239}\text{Pu}$  respecto del  $^{240}\text{Pu}$ . Estos dos nucleidos en todos los casos constituyen alrededor del 95% del plutonio presente. En la Tabla I, pág. 206, del "Bericht KFK"(1) se puede observar que la concentración de  $^{235}\text{U}$  en el combustible quemado es del orden de 0,3%, es decir que la relación final  $^{235}\text{U}/^{239}\text{Pu}$  es del orden de la unidad.

TABLA 24

Contribución de los nucleídos fisiónables al quemado relativo total

| Muestra | Quemado<br>Relativo<br>(FIMA)% * | Contribución relativa (%) |       |        |        |
|---------|----------------------------------|---------------------------|-------|--------|--------|
|         |                                  | U-235                     | U-238 | Pu-239 | Pu-241 |
| 2 T     | 0,503                            | 60,4                      | 8,2   | 30,8   | 0,6    |
| 10 T    | 0,509                            | 57,8                      | 8,0   | 33,4   | 0,8    |
| 19 T    | 0,543                            | 58,0                      | 8,0   | 33,2   | 0,8    |
| 23 T-2  | 0,869                            | 50,6                      | 8,3   | 39,2   | 1,9    |
| 23 T-5  | 0,611                            | 57,8                      | 8,2   | 32,9   | 1,1    |
| 23 T-8  | 0,287                            | 62,1                      | 8,0   | 29,6   | 0,4    |
| 24 T    | 0,653                            | 54,2                      | 8,1   | 36,5   | 1,2    |
| 28 T    | 0,626                            | 55,9                      | 8,2   | 34,8   | 1,1    |

(\*) Medido por el método de relaciones isotópicas de átomos pesados.

### 8.3. Metalografía - Ceramografía

Con el objeto de verificar el comportamiento de vainas y óxido de elementos combustibles y su interacción se realizaron observaciones microscópicas de secciones transversales centrales de las probetas 23 T y 28 T y cercanas a los extremos en la probeta 23 T. También se efectuaron observaciones de secciones longitudinales de los extremos inferiores de las barras 2T; 10T; 19T; 23T; 24T y 28T y del extremo superior de la barra 23 T.

Asimismo se examinaron las superficies de contacto entre pastillas de la barra 23 T.

Las observaciones dieron información sobre:

Interacción mecánica y química entre pastillas entre sí.

Comportamiento del óxido de uranio bajo las condiciones de irradiación impuestas

y como consecuencia de esto estimación de la distribución de temperaturas en el óxido.

Comportamiento del material de vainas con particular atención a las soldaduras y comportamiento químico frente al D<sub>2</sub>O.

La ubicación de las muestras para observación microscópica y su numeración aparecen en la Ref. 1.

### 8.3.1. Interacción vaina-óxido

#### 8.3.1.1. Interacción mecánica:

Juego diametral - Se ha podido comprobar que luego de la irradiación subsiste un juego diametral entre vaina metálica y combustible que permite el libre desplazamiento de las pastillas dentro de la barra, en base a las observaciones siguientes:

- a) El examen de superficie de pastillas, Fig.34, muestra un desplazamiento relativo entre los dos grandes fragmentos en que aparecía dividido el óxido.
- b) Las secciones transversales y longitudinales presentan todas un juego diametral. En la Tabla 25 se indican los valores de separación entre vaina y óxido en 3 puntos diametralmente opuestos de las secciones transversales examinadas. El mismo sería máximo para la sección 23 T-9. La interpretación de estas cifras se ve dificultada, sin embargo, por la falta de datos preirradiación y por el hecho que las fisuras de las pastillas contribuyen al juego diametral. Asimismo el posible desplazamiento de fragmentos en dirección axial impide otro posible método de comparación basado en la medición de la superficie ocupada por fisuras.

#### 8.3.1.2. Interacción química:

En ninguna sección preparada para observación microscópica se observa interacción entre vaina y óxido. La Fig.35 muestra el aspecto típico de las superficies del óxido y el metal.

TABLA 25

| Juego diametral $\mu\text{m}$ |                                 |                                             |
|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------|
| Probeta                       | Valores diametralmente opuestos | Promedio de valores diametralmente opuestos |
| 23 T-3                        | 10-60                           | 35                                          |
|                               | 35- 6                           | 20,5                                        |
|                               | 50-15                           | 32,5                                        |
|                               | 60-20                           | 40                                          |
| 23 T-4                        | 8-30                            | 69                                          |
|                               | 20-60                           | 40                                          |
|                               | 50-20                           | 35                                          |
|                               | 65-10                           | 37,5                                        |
| 23 T-9                        | 30 80                           | 55                                          |
|                               | 30-90                           | 60                                          |
|                               | 45- 80                          | 62,5                                        |
|                               | 50-40                           | 45                                          |
| 28 T                          | 15-35                           | 25                                          |
|                               | 10-35                           | 22,5                                        |
|                               | 10-30                           | 20                                          |
|                               | 8-12                            | 10                                          |

### 8.3.2. Oxido de uranio

#### 8.3.2.1. Fisuración del óxido:

Durante la irradiación el óxido de uranio sufre una fisuración y fragmentación debido a las tensiones térmicas originadas por la diferencia de temperatura entre el centro de la pastilla y la periferia. Esta fragmentación es ine

vitabile ya que cálculos indican que una diferencia de temperatura menor de  $100^{\circ}\text{C}$  ya produce fisuración en este material. Si bien bajo irradiación parecen necesitarse valores de diferencia de temperatura algo mayores, estos son ampliamente superados en las condiciones normales de operación de un elemento combustible de potencia que para el CNEA-MZFR-Prototipo-I es del orden de  $1000^{\circ}\text{C}$ .

Las tensiones térmicas pueden producirse durante los primeros momentos de la irradiación al introducir el EC en el reactor, al extraerlo del mismo o durante las variaciones de potencia. También pueden producirse fisuras durante la manipulación del EC fuera del reactor o de las barras luego de su desmantelamiento.

Las fisuras que se observan en las secciones transversales y longitudinales presentan el aspecto característico de las producidas por tensiones térmicas (6)(7). En las secciones transversales se observa una gran fisura diametral acompañada de otra fisura diametral o fisuras radiales o aproximadamente radiales y otras fisuras más pequeñas. El esquema de fisuras que se ha representado en la Fig.36 muestra parecido entre las secciones de las probetas 23 T-3 y 23 T-4. La falta de una identificación de la orientación de las barras respecto al centro del reactor impide verificar si la gran fisura diametral tiene la misma orientación a lo largo de la columna en la barra 23 T. Sin embargo el análisis de las autoradiografías indicaría que no existe tal identidad de orientación. En la Fig.36 se han indicado los sectores con mayor enriquecimiento en productos de fisión que deben corresponder a sectores ubicados en la misma posición respecto al centro del reactor. Se ve que no hay una coincidencia entre la posición de la fisura y la zona de mayor actividad.

Esto permite suponer que la distribución de temperatura en la pastilla al comienzo de la irradiación, que es cuando más probablemente se han producido las fisuras, no está relacionada con la posición de la barra respecto al centro del reactor o al flujo del mismo sino a la posición o contacto de las pastillas con la vaina y además al juego entre óxido y vaina.

En las radiografías las fisuras radiales se observan sólo en algunos casos. La ausencia de fisuras de este tipo en radiografías no indica que la pastilla no las presente. Para que sean detectables las fisuras tienen que ser paralelas o casi paralelas a la marcha de los rayos y esto sólo se da en algunos casos. Se puede suponer con fundamento que todas las pastillas presentan fisuras radiales.

Las pastillas presentan también fisuras según planos más o menos paralelos a las bases. Estas fisuras se encuentran con mayor frecuencia en las radiografías debido a que presentan una orientación más favorable para su detección.

La presencia de fisuras es más notable en el extremo inferior de mayor quemado y potencia lineal que en el extremo superior de las barras. Un examen de las radiografías así lo muestra.

#### 8.3.2.2. Fragmentación del óxido:

Por fragmentación se entiende la destrucción de la pastilla por separación de los trozos producidos por la fisuración.

El examen de secciones longitudinales de barras preparadas para examen microscópico muestra que dos de ellas presentan fragmentación considerable. El examen de radiografías permite comprobar que algunas pastillas aparecen fragmentadas, en particular las que están en contacto con el tapón. Esto puede deberse a una distribución diferente de gradientes de temperatura, a efectos de la soldadura, a defectos de las pastillas o a efectos mecánicos, durante la manipulación o en el armado.

Si bien es posible que en las dos secciones longitudinales de extremos de barras en que se observa fragmentación, las causas de la misma hayan sido las condiciones de fabricación u operación, llama la atención que en ambos casos se trate de probetas más cortas que el resto (19 mm contra 24 mm). Es posible en consecuencia que la fragmentación se haya producido durante el seccionamiento de la probeta.

Con respecto a la fragmentación que se observa en las barras y puesta de manifiesto en las radiografías no hay elementos de juicio suficientes como para establecer su origen. Se observa sin embargo que hay mayor proporción de pastillas fragmentadas en los extremos inferiores que en los superiores. Las pastillas en contacto con el tapón inferior presentan un tipo de fragmentación diferente al de aquellas que están en contacto con el tapón superior. Aquellas aparecen divididas en trozos pequeños mientras que para el otro extremo el caso observado presenta una pastilla dividida aparentemente en dos mitades por una fisura diametral.

Es probable que en la fragmentación jueguen un papel importante los factores ajenos a la irradiación, tales como calidad de la pastilla, condiciones de armado, posibles choques mecánicos externos o debidos al movimiento de la columna de óxido dentro de la vaina, soldadura de tapones. Las fragmentaciones podrían tener por causa uno o más de uno de estos factores actuando independientemente. Esta sería la razón de que aparezcan pastillas fragmentadas aisladas y en algunos casos en medio de pastillas que presentan gran integridad.

A pesar de las pastillas fragmentadas observadas, el estado de la columna de óxido puede considerarse como muy aceptable.

#### 8.3.2.3. Microestructura:

El óxido no muestra alteraciones mayores. No se observan las estructuras de granos columnares o la zona de crecimiento de grano características de óxido irradiado, debido a que la temperatura del combustible no alcanzó valores que permitan el desarrollo de esas morfologías.

De acuerdo a las estructuras observadas la temperatura en el centro de la pastilla no ha superado los 1400°C.

Sin embargo el material ha sufrido un cierto grado de evolución. En efecto, el material sin irradiar o irradiado a baja potencia presenta "islas" de 250  $\mu\text{m}$  de diámetro promedio (Fig.37) que presentan porosidad inter e intragranular separa-

das entre sí por una "red" de granos de mayor tamaño y que presentan menos porosidad (Fig.38). Las zonas de mayor porosidad y menor tamaño de grano debido a la estructura más fina presentan un aspecto más oscuro sobre todo a bajos aumentos. En algunos casos, puntos oscuros que parecen porosidad de gran tamaño se revelan con mayor aumento como zonas de alta porosidad y grano pequeño. En la sección transversal que aparece en la Fig.39 se señala una zona de este tipo y el aspecto que presenta con mayor aumento, Fig.40.

En el material irradiado, Fig.41 se observa que en la zona central de la pastilla, las "islas" no son visibles.

Con gran aumento se ve que en la zona central, Fig.42, el material presenta tres características que lo distinguen del no irradiado:

- i) la porosidad prácticamente ha desaparecido;
- ii) el tamaño de grano es más uniforme;
- iii) el tamaño de grano ha aumentado ligeramente.

En la Tabla 26 se consigna el tamaño de grano de las diferentes probetas y se comprueba el ligero aumento de tamaño de grano de las probetas 23 T-3 y 28 T-3 que corresponden a los extremos inferiores de las barras con respecto a las probetas 23 T-4 y 23 T-7 que corresponden a zonas de menor irradiación.

TABLA 26

| Probeta | Intersecciones/100 $\mu\text{m}$ | $\bar{T}(\mu\text{m})$ |
|---------|----------------------------------|------------------------|
| 23 T-3  | 24                               | 4,17                   |
| 23 T-4  | 27                               | 3,70                   |
| 23 T-7  | 26                               | 3,85                   |
| 23 T-3  | 25                               | 4,00                   |

Una evaluación cuantitativa del porcentaje que ha evolucionado no es simple ya que a diferencia del fenómeno de crecimiento de grano o de aparición de la región columnar, no existe un límite neto de separación entre zonas que han evolucionado y las que no lo han hecho. El grado de transformación se podría indicar como área de la probeta con islas respecto al área total. Sin embargo no se cuenta con micrografías como para hacer esa medición. Por otra parte el fenómeno no es simétrico y en consecuencia tampoco se pueden usar los panoramas radiales.

Las Figs. 43 correspondientes a la probeta 23 T-4 muestran también tamaño de gra

no irregular y baja porosidad. Esto indicaría que durante irradiación se produciría primero una disminución de porosidad y luego aumento del tamaño de grano.

Las razones por las cuales el óxido ha evolucionado deben atribuirse casi con seguridad al hecho que el material no ha llegado durante la sinterización a una estructura de equilibrio o prácticamente de equilibrio.

Las secciones de material irradiado no mostraron en ningún caso inclusiones metálicas, que fueron aparentes en casi todas las secciones examinadas durante el control de fabricación de las pastillas.

Las inclusiones metálicas pueden haber desaparecido durante irradiación por oxidación y difusión en el óxido de uranio. No parece que el efecto de desaparición de inclusiones sea debido a disolución durante la preparación metalográfica aunque tal posibilidad debe ser examinada en próximos ensayos post irradiación. En ese caso deberán examinarse las secciones luego del desbastado y luego del pulido mecánico-ataque para verificar la presencia o desaparición de las mismas.

### 8.3.3. Zircaloy

#### 8.3.3.1. Vaina:

El material de vaina ha sido examinado en particular en las probetas preparadas para estudiar las soldaduras.

En una sección transversal se ha realizado observación de óxido en la superficie de contacto con el D<sub>2</sub>O.

En las zonas examinadas no se han observado anomalías en el metal. Estructuras del material de tubos se pueden ver en la figura 45 y del material de tapón en la figura 46.

El problema del óxido se discute más adelante.

#### 8.3.3.2. Soldaduras:

Si bien los elementos combustibles no evidenciaron pérdidas detectables por el sistema de seguridad del reactor esto no significa que se pueda excluir la presencia de defectos de pequeñas dimensiones.

Sin embargo, en el examen de los elementos y en particular de las soldaduras no se han encontrado defectos que puedan hacer suponer la existencia de tales fallas. En especial las soldaduras examinadas, salvo una, no presentan anomalías en cuanto a estanqueidad.

Es de hacer notar sin embargo que el aspecto que presentan las soldaduras no es el mismo en todas ellas. De acuerdo a su aspecto se las ha clasificado en tres tipos, ver Fig.47.

Es necesario tener en cuenta que el examen sólo se refiere a dos puntos diametralmente opuestos de la soldadura y que es probable que ésta varíe a lo largo de la misma debido al calentamiento progresivo del extremo de la barra a medida que avance la soldadura. Sin embargo debido a la magnitud de la diferencia entre distintas barras es casi seguro que las variaciones de morfología se deben a diferentes condiciones de fabricación de la unión.

Las condiciones de soldadura fueron determinadas para obtener el tipo, y el examen micrográfico post-irradiación estaba, en gran medida, dirigido en lo que a soldadura respecta a verificar la presencia de grietas producidas en la raíz de la separación entre tubo y tapón.

En ninguna barra se ha encontrado una fisura que pueda atribuirse a elevada concentración de tensiones.

En la barra 24 T se ha observado una sopladura de 250  $\mu\text{m}$  de diámetro. Esto corresponde a 2,5% del diámetro de la barra y en consecuencia está por debajo del límite de detección del examen con rayos X. En esa soldadura se observa asimismo en la sección de la superficie cilíndrica de unión entre tapón y tubo un rosario de poros, Fig. 48 y también una línea que podría ser una fisura. Sin embargo estas fallas no han dado origen a ningún percance durante la operación del reactor.

Debido al calentamiento producido durante la soldadura en la zona del tubo próxima al tapón se pueden reconocer dos zonas en las que el zircaloy ha recrystalizado, y que se diferencian muy claramente por el tamaño de grano. La zona más próxima al tapón y que ha adquirido mayor temperatura presenta mayor tamaño de grano que la zona más alejada.

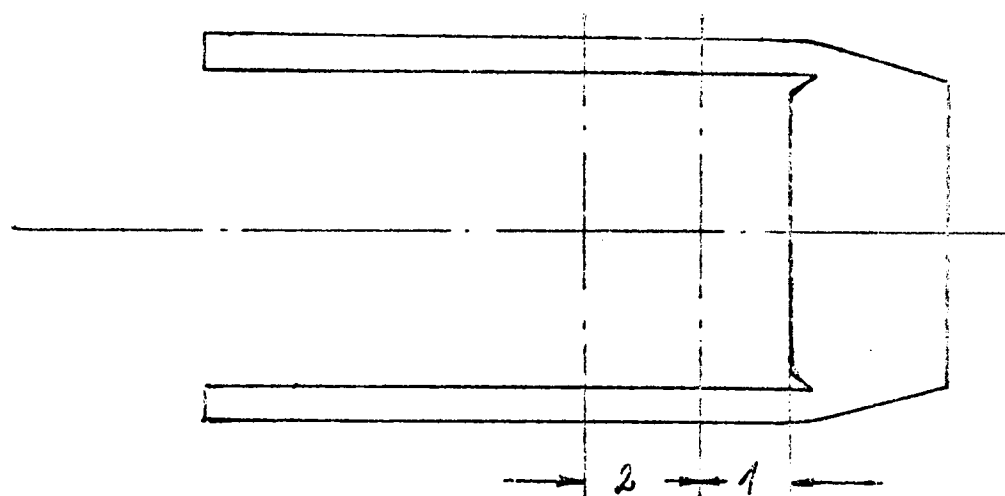
En las Figs. 45, 49, 50 y 51 se pueden reconocer estas zonas. El tamaño de grano en la zona de grano grande va de 150 - 200  $\mu\text{m}$  a 30 - 50  $\mu\text{m}$ , mientras que en la zona de grano pequeño se estima que el mismo es de 10  $\mu\text{m}$  o menos.

La longitud de las zonas recrystalizadas, consignadas en la Tabla 27 no es la misma para todos los tubos. Sobre las causas de esto se pueden hacer las mismas consideraciones que con respecto a la causa de las diferentes morfologías de las soldaduras.

Penetración de la soldadura. Sólo ha sido posible en pocos casos hallar la penetración de la soldadura con las micrografías con que se cuenta. En general parece más ventajoso realizar el examen con luz polarizada. En ese caso se nota una diferencia de tamaño de grano a ambos lados de una línea imaginaria que separa la zona fundida de la zona que no ha pasado a estado líquido. Con luz normal en algunas micrografías se observa una banda clara que podría corresponder a esa separación. En los casos en que se pudo medir, la penetración se ha estimado en 2,5 a 3 mm.

Podría ser de interés obtener una correlación entre condiciones de soldadura,

TABLA 27



Area recristalizada

1. Grano grueso (ver ilustración)
2. Grano fino (ver ilustración)

| Probeta<br>N° | 1 (mm) | 2 (mm) |
|---------------|--------|--------|
| 2 T-1         | 3,5    | 3,2    |
| 19 T-1        | 4,0    | 3,7    |
| 10 T-1        | 4,6    | 3,0    |
| 23 T-1        | 1,5    | 1,5    |
| 23 T-9        | 3,6    | 2,7    |
| 24 T-1        | 1,3    | 0,6    |
| 28 T-1        | 0,9    | 0,4    |

penetración, longitud de las zonas recristalizadas y susceptibilidad a la aparición de puntos blancos y eventualmente corrosión e hidruración. Por el momento tal evaluación es imposible con los elementos de juicio con que se dispone.

### 8.3.3.3. Corrosión:

Las barras en que se ha removido el óxido suelto de la superficie presentan un color negro brillante correspondiente al óxido de circonio que las recubre.

En el extremo inferior de la barra 10 T, se ha notado la presencia de puntos claros lo que de acuerdo a su distribución parecen tener alguna relación con el calentamiento sufrido por el material durante la soldadura.

Las micrografías, Fig.50 por ejemplo, muestran que la película de óxido es muy fina (espesor menor que  $1\text{ }\mu\text{m}$ ); sin embargo en algunos lugares la película adquiere mayor espesor tomando aspecto lenticular.

La Fig.51 permite verificar que en la zona delgada el espesor del óxido no es completamente uniforme ya que la interfase metal óxido es menos plana que la interfase óxido-aire. En la zona lenticular el óxido presenta lo que parecen ser grietas y porosidad.

El espesor máximo de óxido en la zona lenticular es de  $15\text{ }\mu\text{m}$  y el diámetro  $100\text{ }\mu\text{m}$ . En el resto de la probeta el espesor del óxido es mucho menor. Se comprueba sin embargo que el espesor no es completamente uniforme debido al hecho ya señalado que la interfase metal-óxido es más rugosa que la interfase óxido-D<sub>2</sub>O.

Es muy probable que los puntos blancos que se observan en las fotografías del extremo inferior y a lo largo de la barra 10 T correspondan al óxido de aspecto lenticular que se observa en la micrografía. El diámetro es del mismo orden y se presenta con mayor frecuencia en la zona cercana a la soldadura. La presencia de esta corrosión localizada en la probeta 28 T-2, a una distancia de 900 mm. del extremo inferior confirmaría las observaciones hechas en la barra 10 T.

En la probeta 23 T-9 también se ha podido observar la existencia de óxido lenticular, Fig.52. Si se tratara del mismo fenómeno de los puntos claros, esto indicaría que dichos puntos pueden aparecer en el extremo superior "frío" de las barras, aunque eso no sea evidente en la 10 T.

Sería en realidad necesario un examen de un número mayor de barras para saber si el fenómeno se presenta en todas ellas en la misma extensión. De todos modos la razón de su aparición debe estar vinculada a las condiciones de soldadura y a las condiciones de operación o irradiación.

Es muy probable que estos puntos claros sean los causantes del aspecto más aserrado de las curvas de diámetro y ovalidad en el extremo inferior de las barras en comparación con las curvas del extremo superior.

### 8.4. Autorradiografías

Se obtuvieron 4 autorradiografías de actividad  $\alpha$  y 4 de actividad  $\beta$  y  $\gamma$  sobre cortes transversales de probetas procedentes de las barras:

23 T, a 45 mm. del extremo inferior de la barra

23 T, a 909 mm. del extremo inferior

23 T, a 63 mm. del extremo superior

28 T, a 900 mm. del extremo inferior

Se reproducen en este informe en dos figuras (53 y 54) autorradiografías correspondientes a la barra 28 T.

En todas las autorradiografías  $\beta$ - $\gamma$  se nota una gradación uniforme de actividad todo a lo ancho de la sección circular: la actividad  $\beta$ - $\gamma$  va aumentando desde un extremo hasta el opuesto de una dirección diametral determinada.

Por otro lado aparece una fuerte acumulación de emisores  $\beta$ - $\gamma$  en las fisuras del óxido de uranio, que aparecen así claramente visibles como líneas blancas sobre fondo más o menos oscuro.

En las autorradiografías  $\alpha$  aparece una gradación uniforme de actividad debida a plutonio "paralela" a la gradación  $\beta$ - $\gamma$  descrita, y por otra parte -completamente en oposición a lo observado en las autorradiografías  $\beta$ - $\gamma$ - se observa que las fisuras del óxido están completamente libres de actividad  $\alpha$ , pues aparecen nítidamente como líneas oscuras sobre fondo más o menos claro. La mayor acumulación de actividad  $\alpha$  se produce a lo largo del borde que corresponde a mayor concentración de emisores  $\alpha$ .

Las fisuras coinciden en todos los casos con las que pueden observarse en las fotografías de los mismos cortes.

Con respecto a las tres probetas obtenidas de la barra 23 T ambas series de autorradiografías permiten notar una intensificación general de radioactividad a medida que se pasa del extremo superior al inferior de la barra.

En alguna autorradiografía ( $\beta$ - $\gamma$ , 23 T inferior) se revelan acumulaciones locales de productos de fisión que no están señaladas por ninguna marca en la micrografía correspondiente.

En conclusión: tanto la distribución de fondo de productos de fisión (emisores  $\beta$ - $\gamma$ , derivados del quemado del combustible) como de plutonio revelan una variación regular de flujo de neutrones a través de las barras. El quemado, por lo tanto, fue más intenso de un lado que del lado opuesto. Los productos de fisión, o algunos de ellos, migran y se concentran en las fisuras del óxido.

## 9. BIBLIOGRAFIA

- (1) KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE, Untersuchungsbericht. Atucha BE1, Karlsruhe, 1973.
- (2) DEPARTAMENTO DE COMBUSTIBLES NUCLEARES, Comisión Nacional de Energía Atómica. Protocolo de Fabricación. Elemento Combustible Prototipo CNEA-MZFR-I. Buenos Aires, 1970. Archivado en el Departamento de Combustibles Nucleares.
- (3) VOGG,H., Halbleiter-Gammaspektren zur Neutronen - Aktivierungsanalyse. Verlag Karl Thieme, Munich, 1971.
- (4) NALIMOV,V.V., The application of Mathematical Statistics to Chemical Analysis, pág. 117 y siguientes. Addison Wesley, Reading, Massachusetts, 1963.
- (5) Referencia (4), tabla XIV.
- (6) ROBERTSON,J.A.L., Irradiation Effects in Nuclear Fuels, pág. 104. Gordon Breach Science Publishers, New York, 1969.
- (7) AAS,S., 'Mechanical Interactions between Fuel and Cladding', Nuclear Engineering and Design, 21, 237-53 (1972).

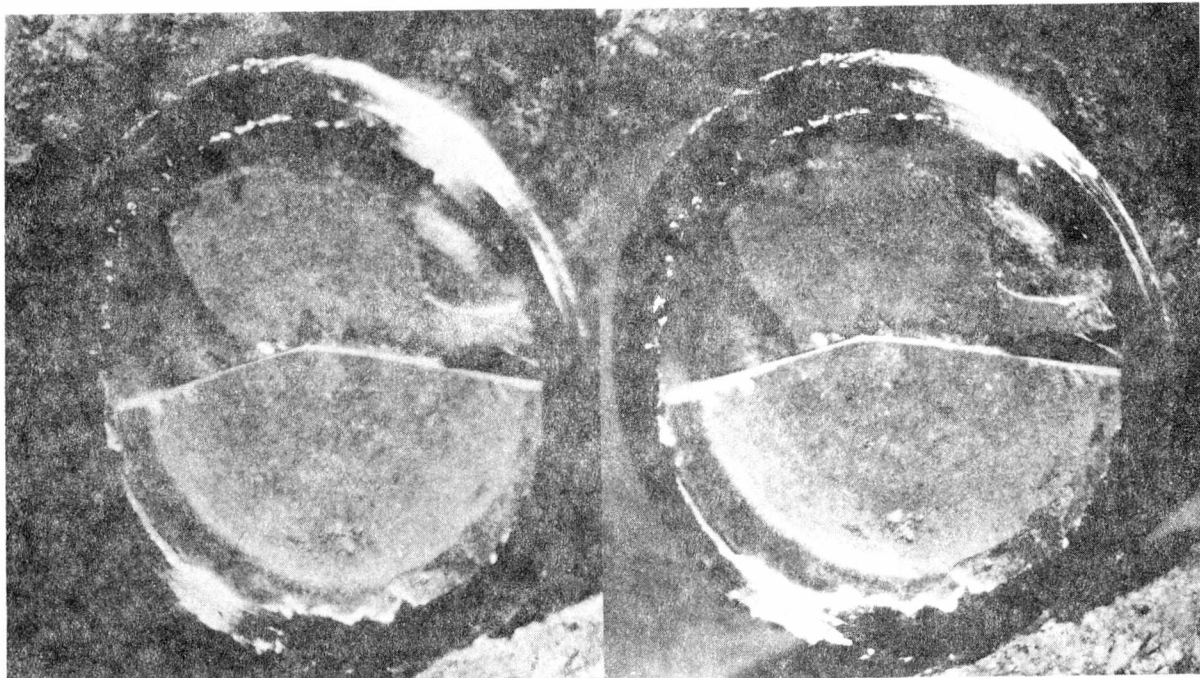


Fig. 34. Par estereográfico. Se observa desplazamiento entre las dos secciones en que aparece dividida la pastilla. Salvo los fragmentos desprendidos posiblemente durante el maquinado del tubo, la pastilla ha sufrido muy poco deterioro. Se observa el "fishing"

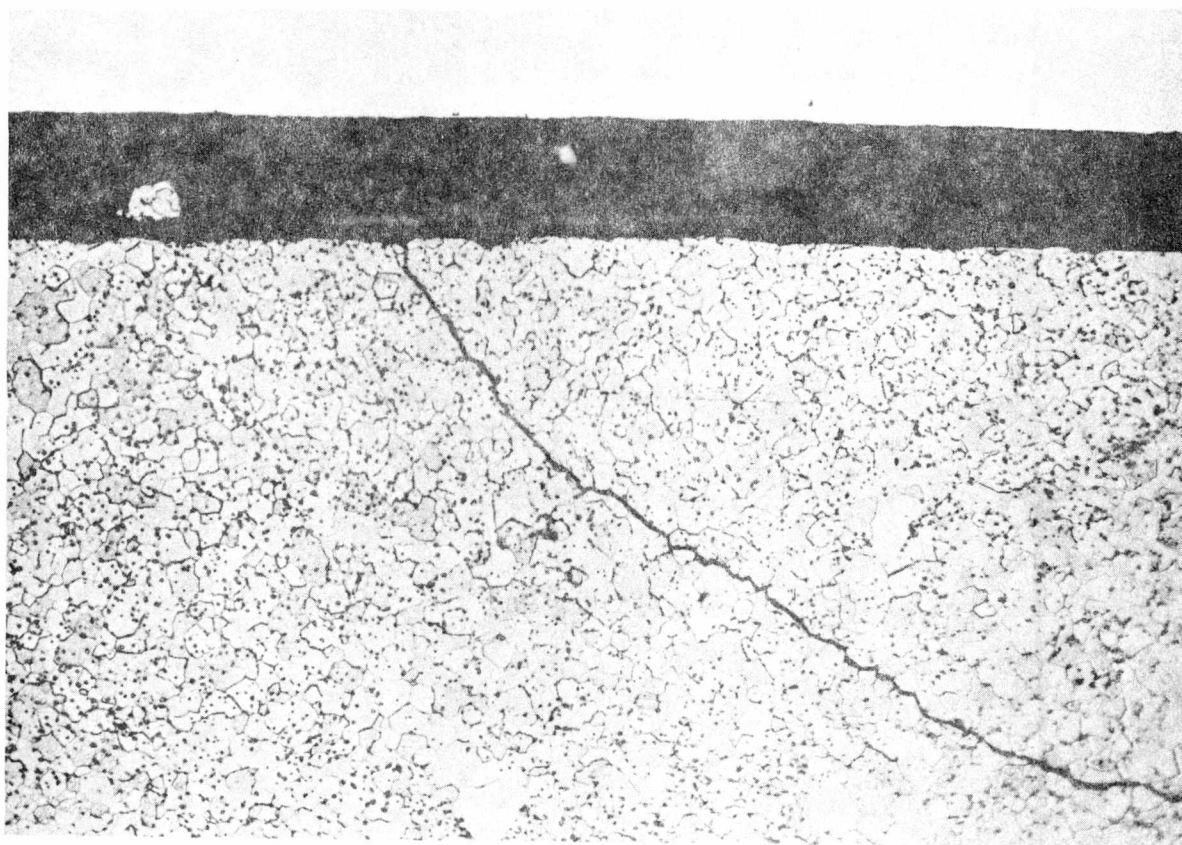
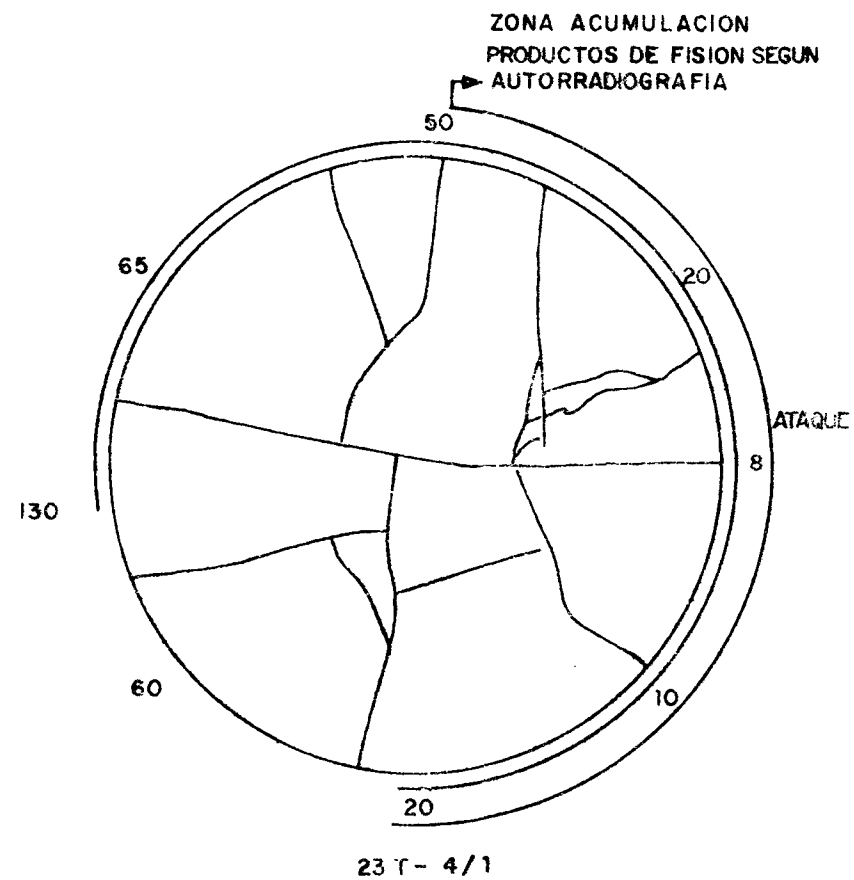
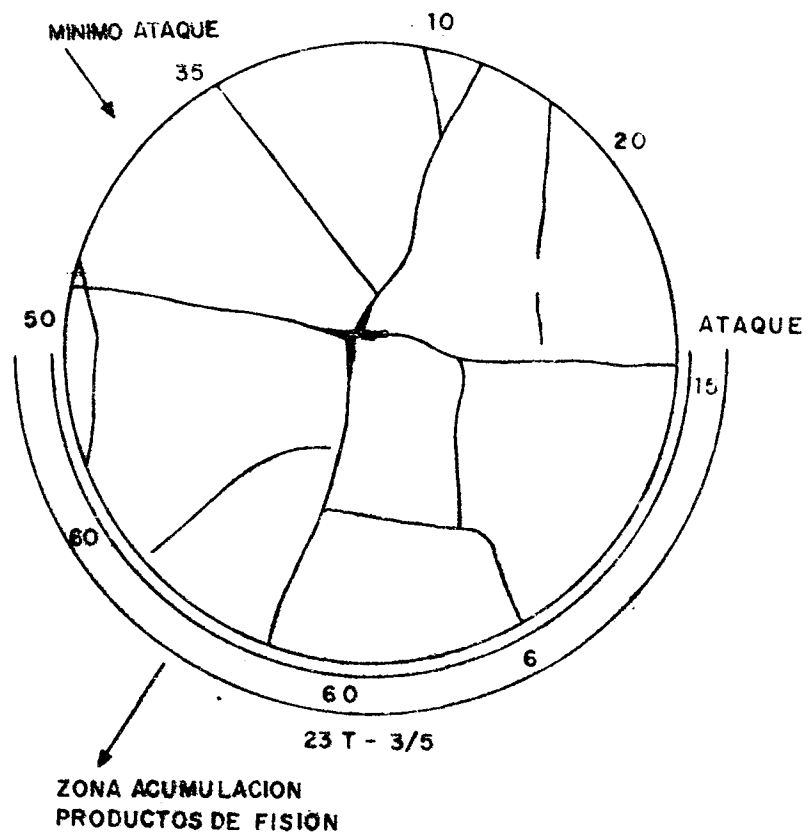


Fig. 35 Problema 23T-3. No se observa interacción química entre óxido (parte inferior de la micrografía) y vaina. La banda oscura corresponde a la resina utilizada en la impregnación (X500)

FIG. 36 A



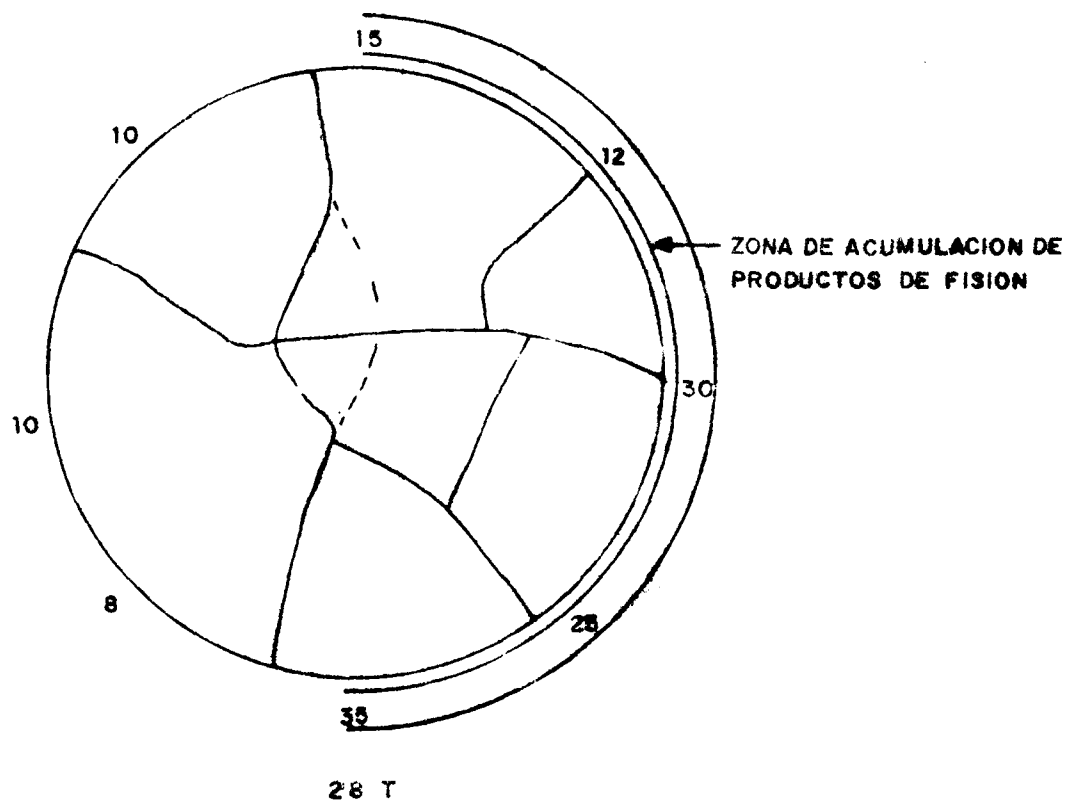


FIG. 36 B

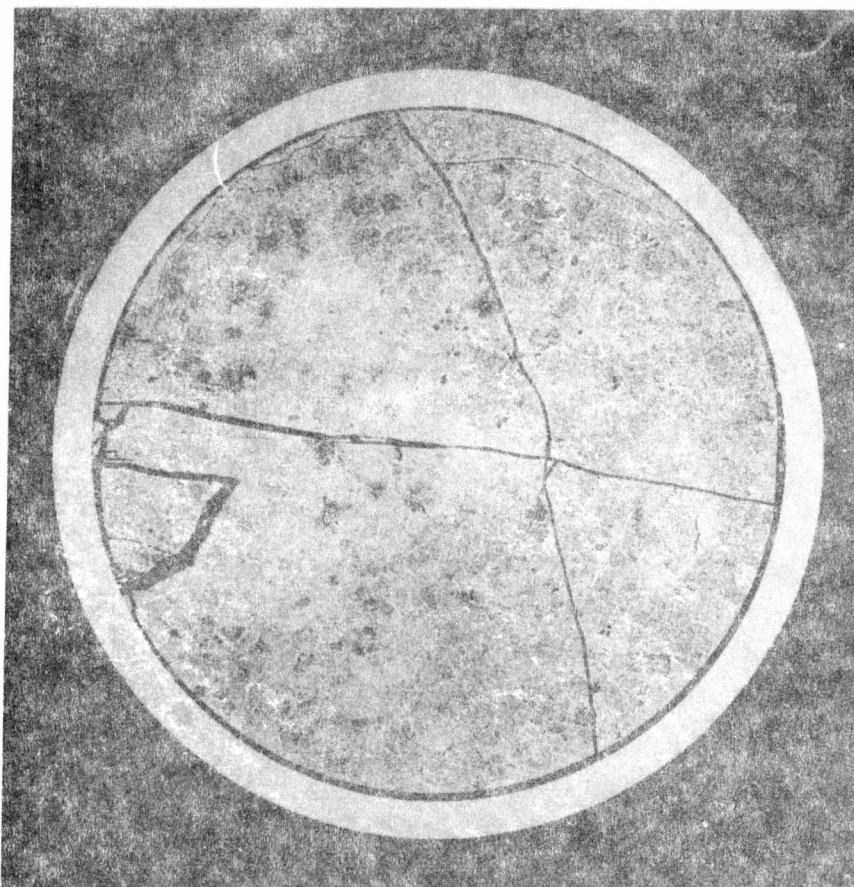


Fig. 37. Probeta 23T-7 - Material poco irradiado  
Se observan "islas" (11X)

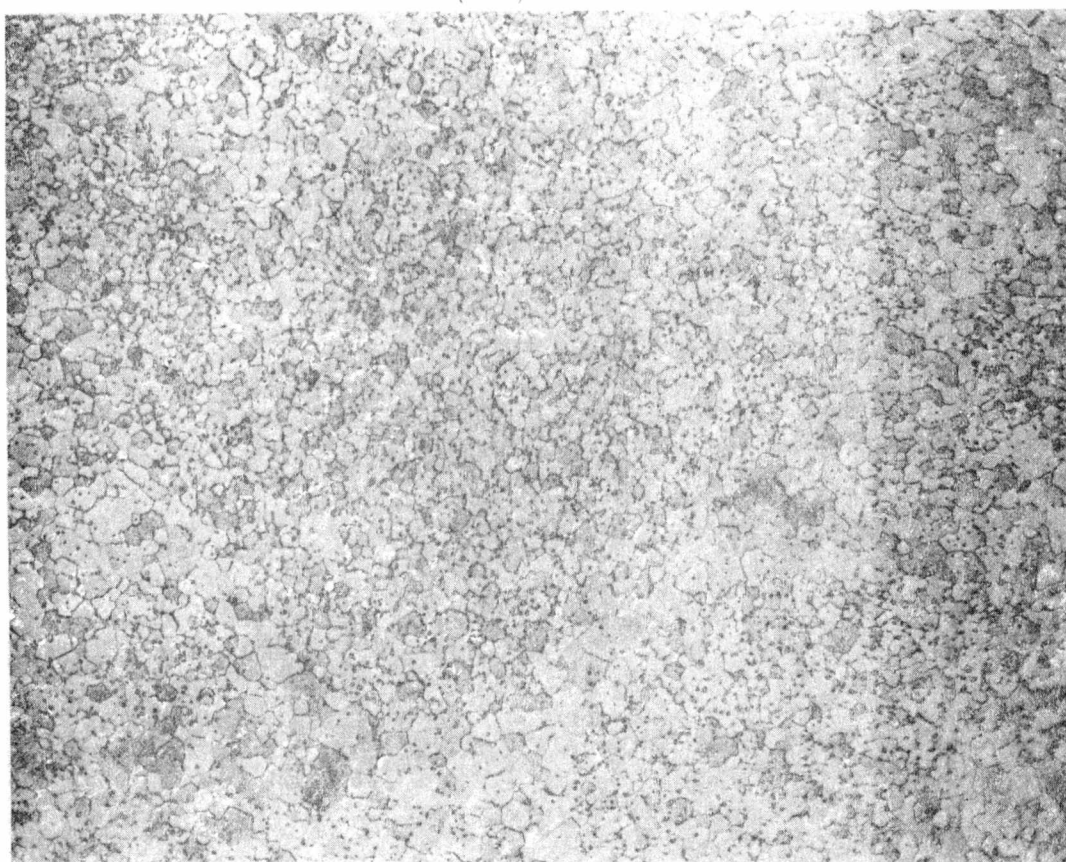


Fig 38. Probeta 23 T-7 - Material poco irradiado. Se observan  
zonas de tamaño de grano pequeño y porosidad ("islas")  
(500 X)

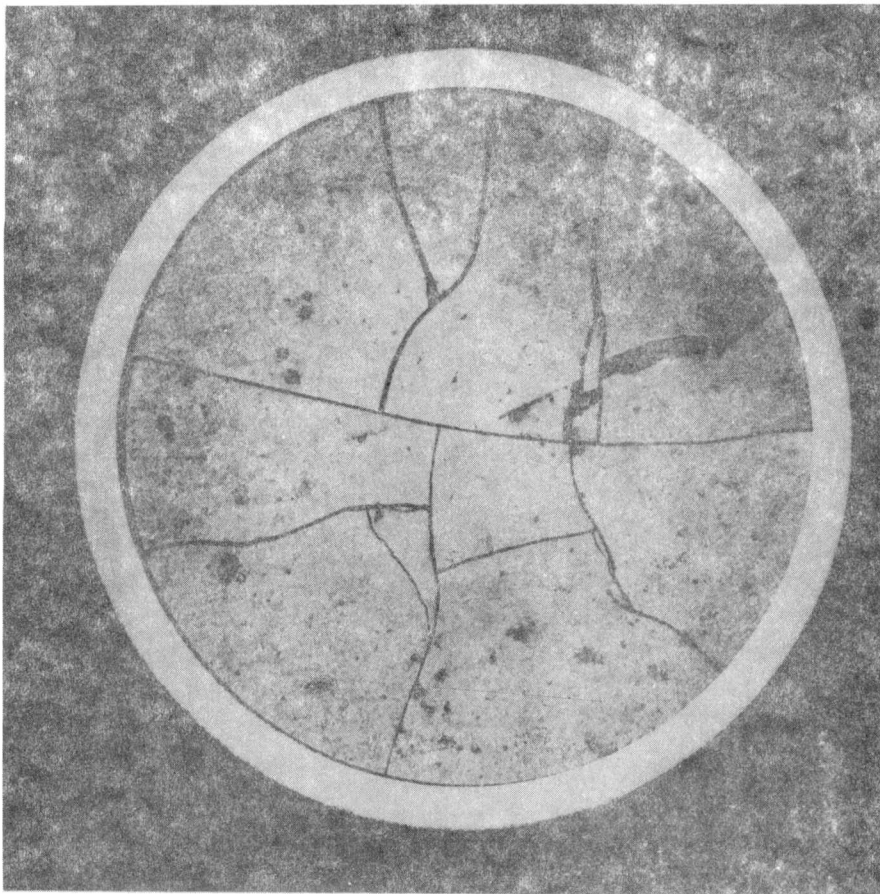


Fig. 39. Probeta 23T-4. Aparece recuadrada la zona examinada con más aumento en la figura siguiente (11X).

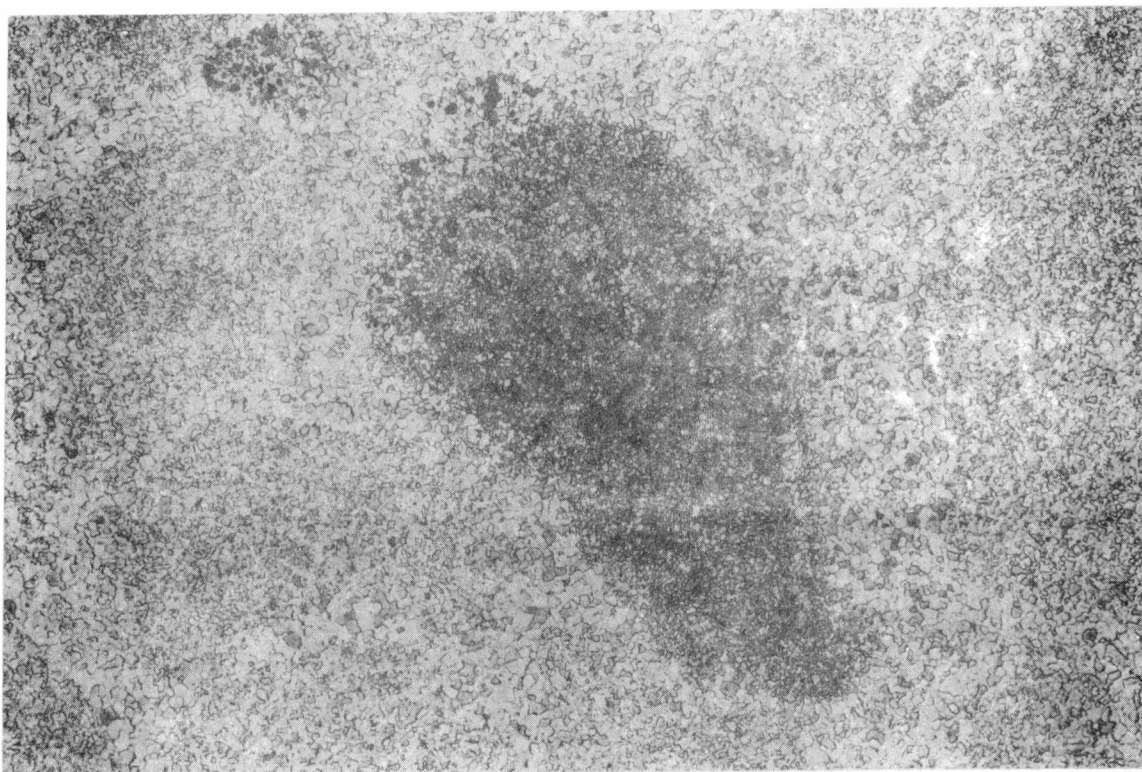


Fig. 40 Probeta 23T-4 A mayor aumento se observa que el punto oscuro señalado en la micrografía anterior corresponde a una zona de grano pequeño (200 X)

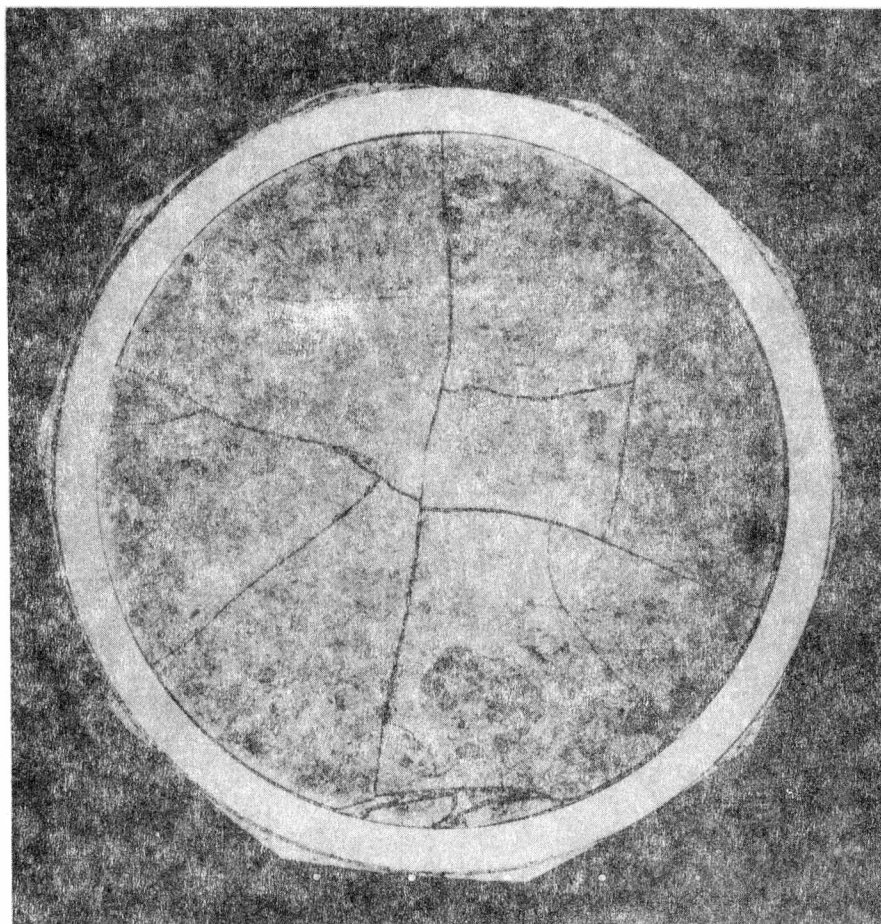


Fig. 41. Probeta 23T-3. No se observan "islas" en el centro de la pastilla (11X)

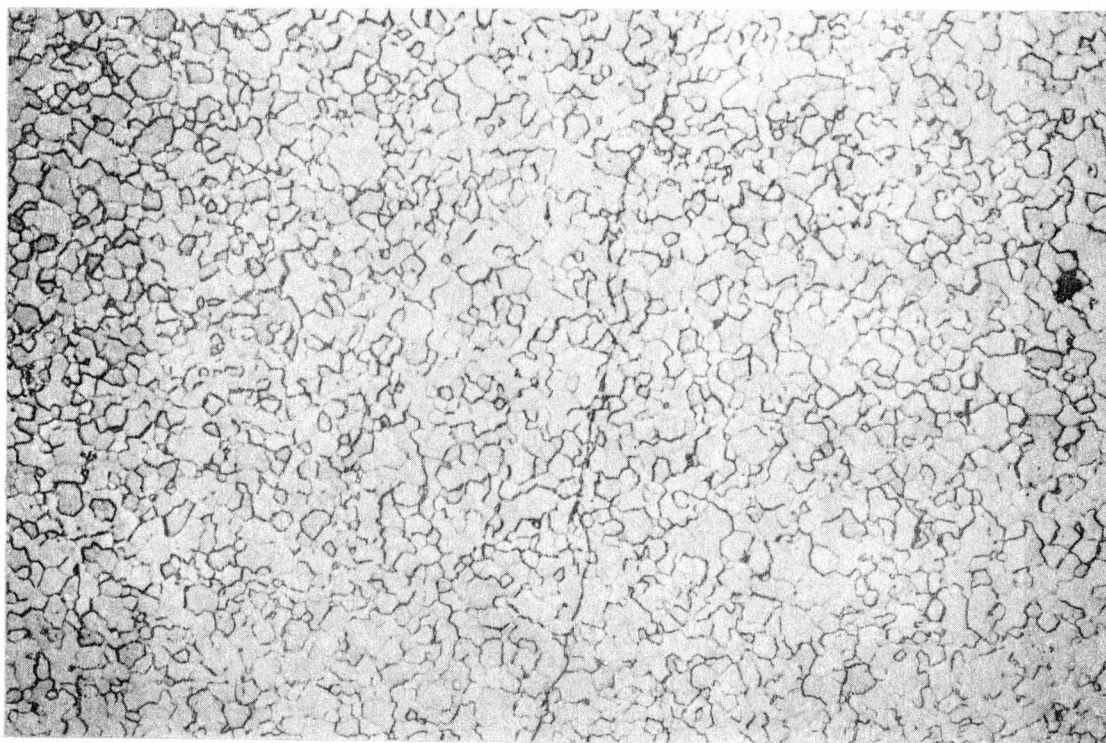


Fig. 42. Probeta 23T-3. Material irradiado. Muy baja porosidad  
Tamaño de grano más uniforme (500 X).

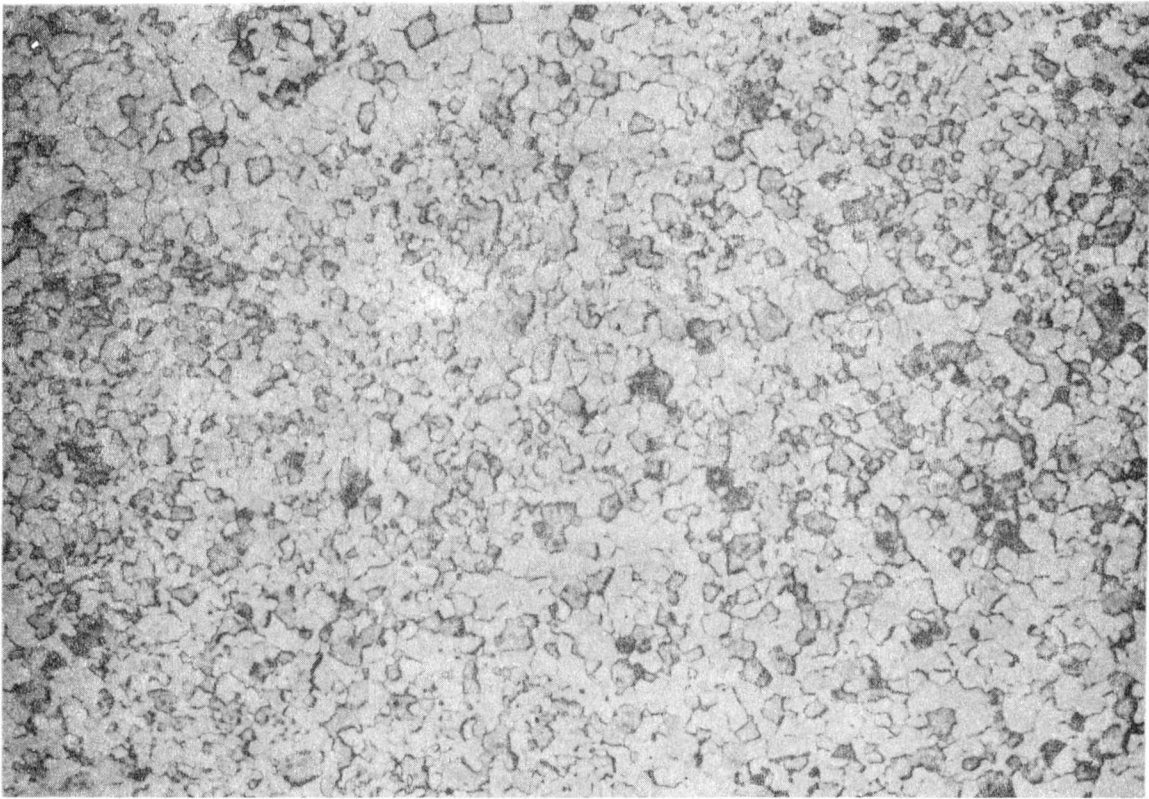


Fig. 43.- Probeta 23 T-4. Se observan zonas de grano pequeño pero baja porosidad (500 X)

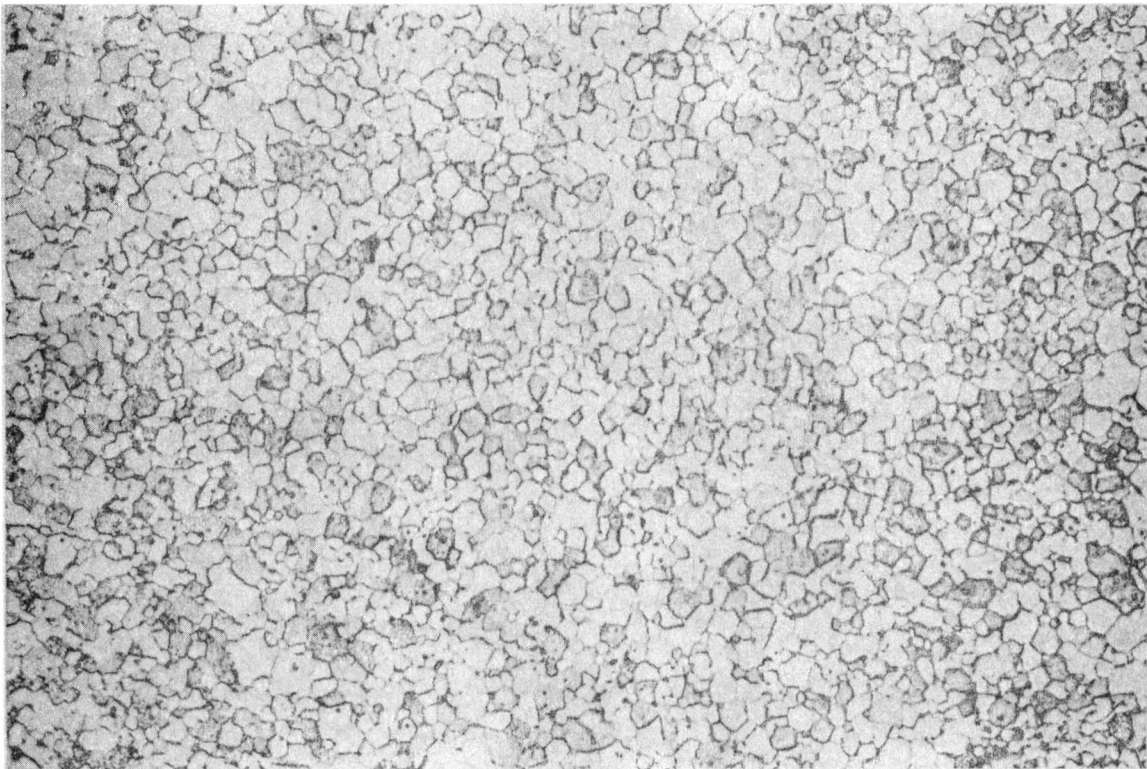


Fig. 44. Probeta 28 T - 2 (500 X)

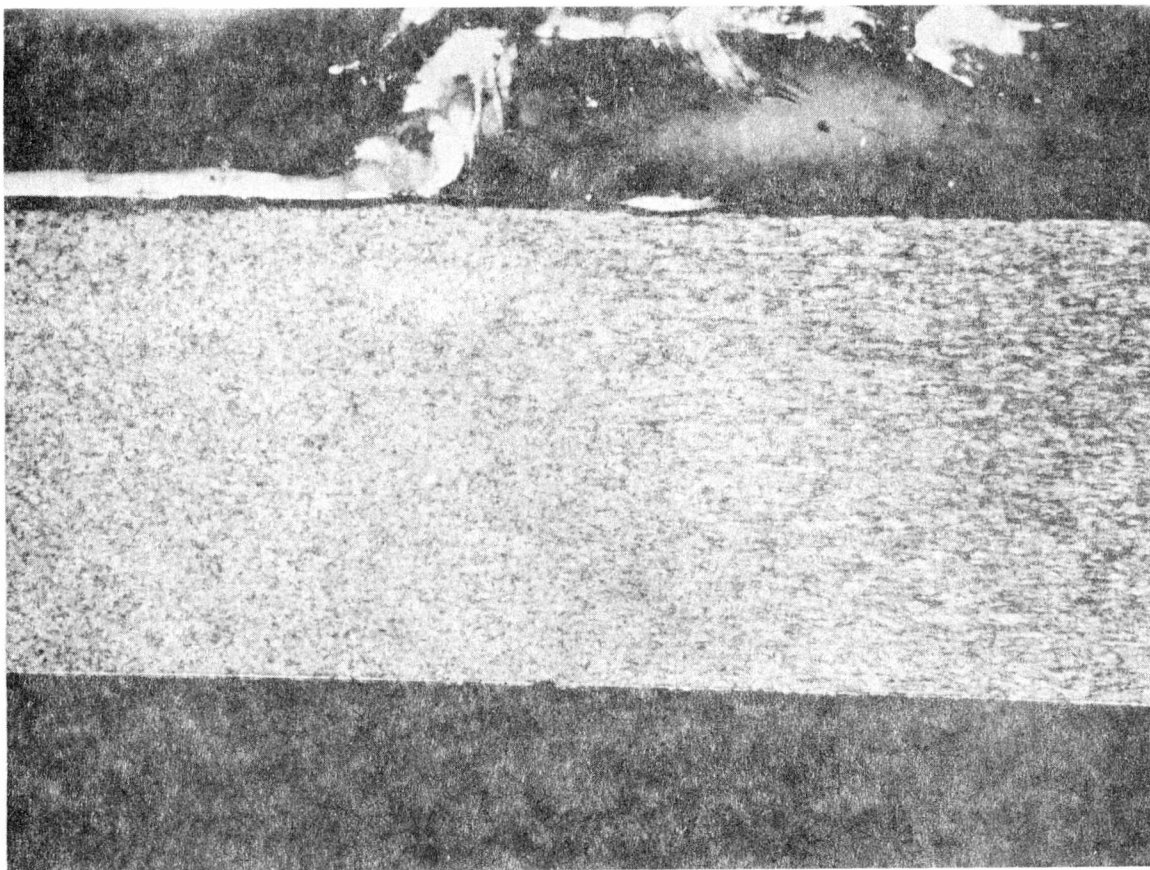


Fig. 45. Probeta 19 T-1 . En el extremo derecho se observa, con luz polarizada, el aspecto del material del tubo (100X)



Fig. 46. Probeta 2T-1 Aspecto del material del tapón  
Luz polarizada (30X)

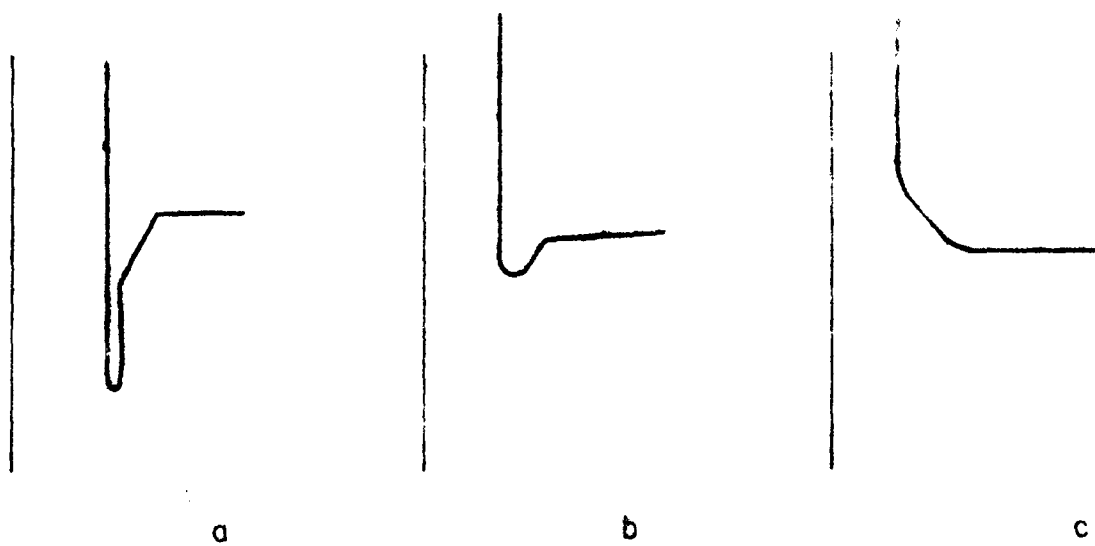


FIGURA 47.



Fig. 48. Probeta 24T-1 - Detalle de soldadura con porosidad (100X)

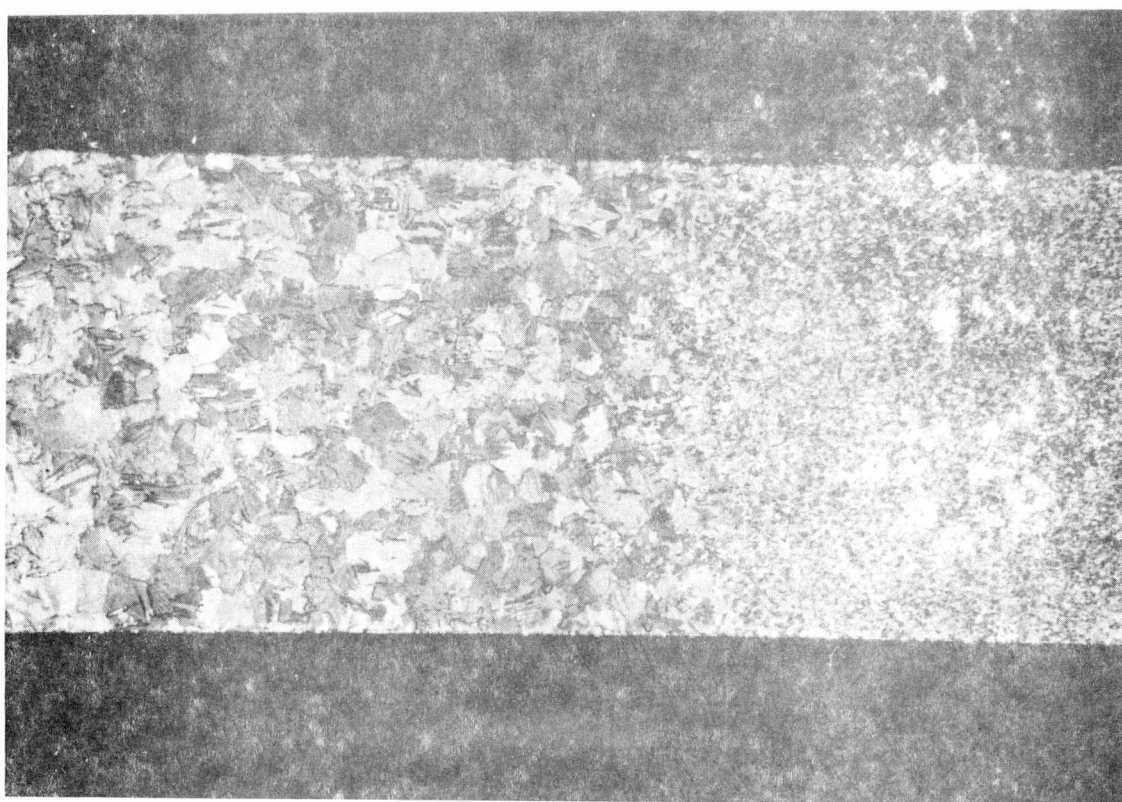


Fig. 49. Probeta 19T-1. Probeta 19 T-1- Zona afectada por el calor  
Se observa grano recristalizado de tamaño grande y pequeño  
Luz polarizada (100X)

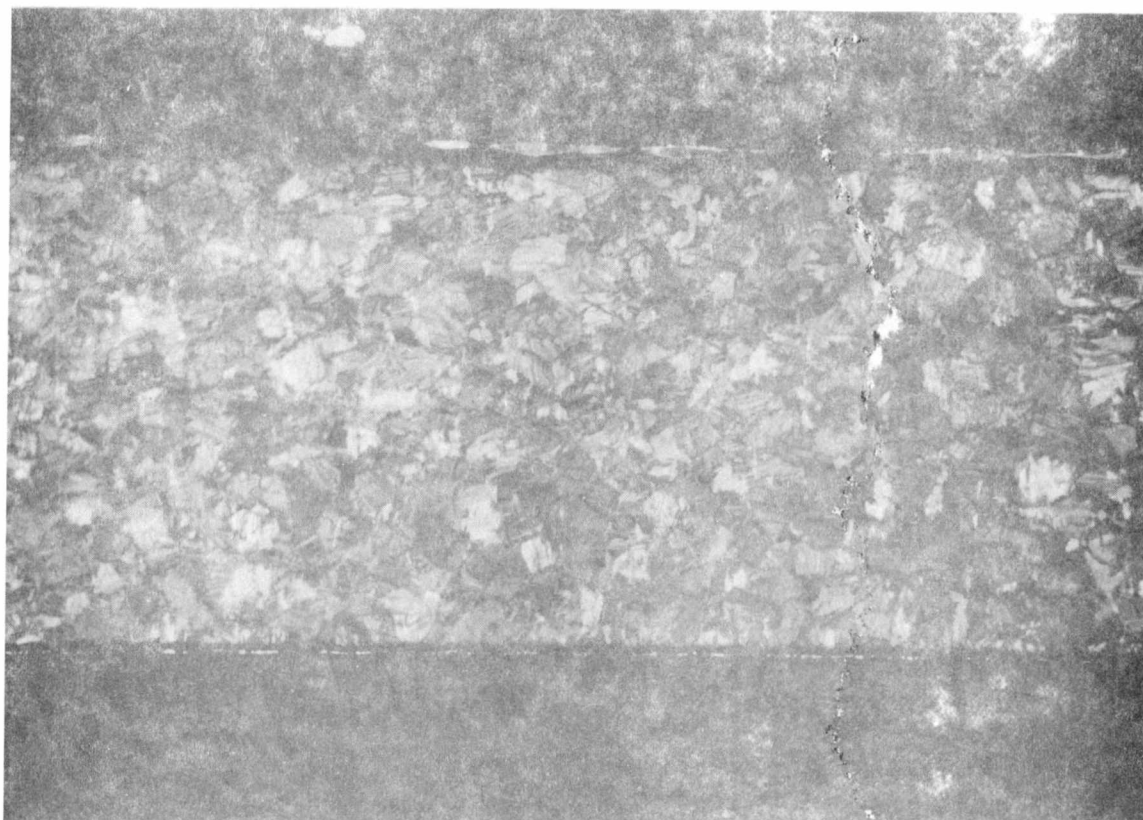


Fig. 50- Probeta 10 T-1 . Aspecto de la película de óxido en el extremo inferior de la barra 10 (100X)



Fig. 51. Probeta 28 T-2. Detalle de la película de óxido (750X)

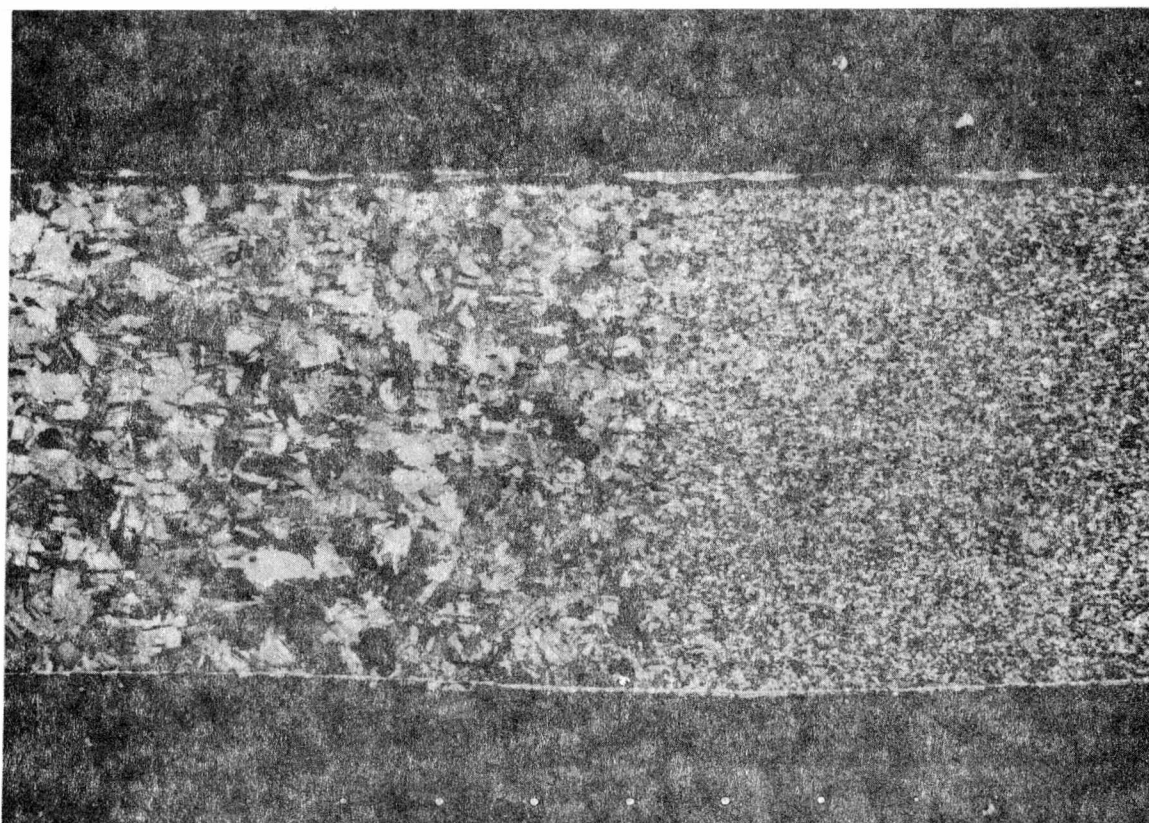


Fig. 52 Probeta 23T-9- Aspecto de la película de óxido en el extremo superior de la barra 23 T.

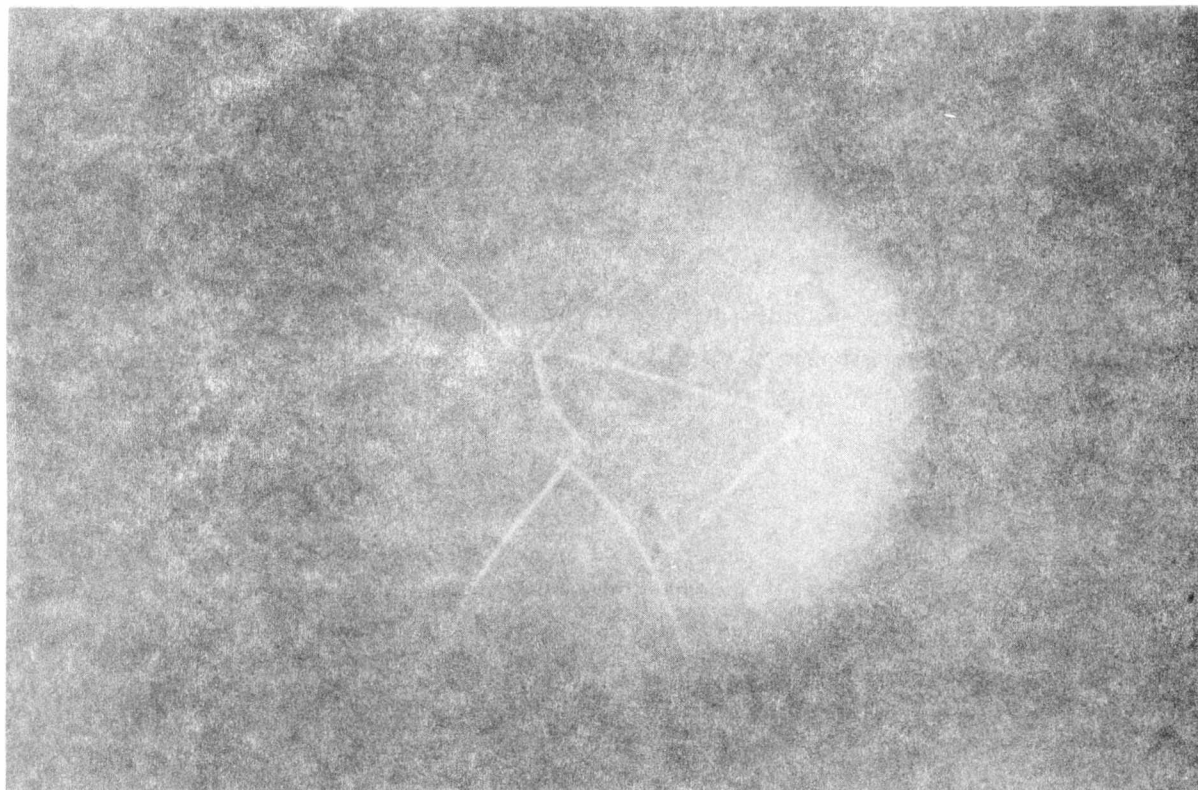


FIG. 53. Autorradiografia  $\beta - \gamma$  (x 8). Barra 28T.

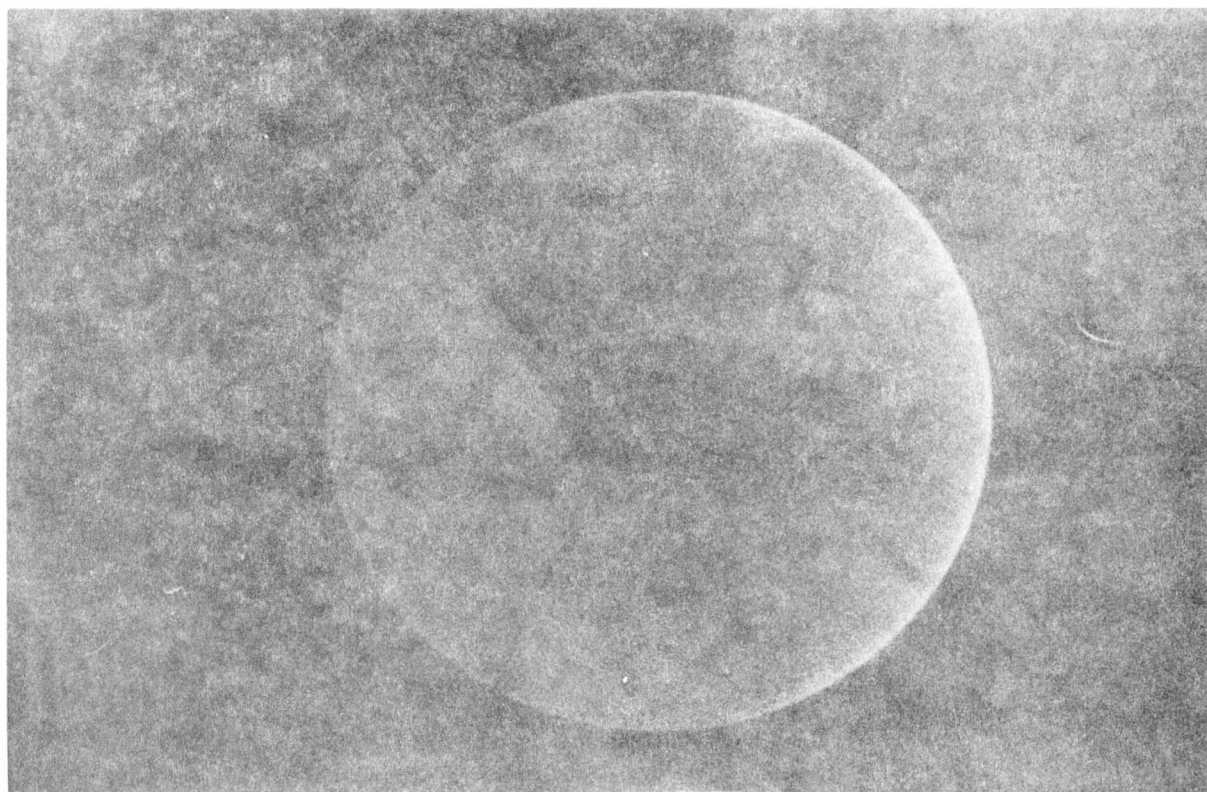


FIG. 54. Autorradiografia  $\alpha$  (x 8). Barra 28T.