



**FABRICACIÓN DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES
PARA REACTORES DE INVESTIGACIONES**

*THARCÍSIO DAMY DE SOUZA SANTOS
HELITON MOTTA HAYDT
CLAUER TRENCH DE FREITAS
ERBERTO FRANCISCO GENTILE
JOSÉ DEODORO TRANI CAPOCCHI
SEBASTIAO HERMANO LEITE CINTRA*

PUBLICAÇÃO IEA N.º 190
Outubro — 1969

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
Caixa Postal 11049 (Pinheiros)
CIDADE UNIVERSITÁRIA "ARMANDO DE SALLES OLIVEIRA"
SAO PAULO — BRASIL

FABRICACIÓN DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES
PARA REACTORES DE INVESTIGACIONES (§)

Tharcísio Damy de Souza Santos
Heliton Motta Haydt
Clauer Trench de Freitas
Erberto Francisco Gentile
José Deodoro Trani Capocchi
Sebastião Hermano Leite Cintra

Divisão de Metalurgia Nuclear
Instituto de Energia Atômica
São Paulo - Brasil

Publicação IEA Nº 190

Outubro - 1969

§ Trabajo presentado a la Segunda Asamblea General del Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, Madrid, Junio 1969 e discutido pelo Prof. Tharcísio Damy de Souza Santos.

Comissão Nacional de Energia Nuclear

Presidente: Prof.Dr. Hervásio Guimarães de Carvalho

Universidade de São Paulo

Reitor: Prof.Dr. Miguel Reale

Instituto de Energia Atômica

Diretor: Prof.Dr. Rômulo Ribeiro Pieroni

Conselho Técnico-Científico do IEA

Prof.Dr. José Moura Gonçalves	}	pela USP		
Prof.Dr. José Augusto Martins				
Prof.Dr. Rui Ribeiro Franco			}	pela CNEN
Prof.Dr. Theodoretto H.I. de Arruda Souto				

Divisões Didático-Científicas

Divisão de Física Nuclear -
Chefe: Prof.Dr. José Goldenberg

Divisão de Radioquímica -
Chefe: Prof.Dr. Fausto Walter de Lima

Divisão de Radiobiologia -
Chefe: Prof.Dr. Rômulo Ribeiro Pieroni

Divisão de Metalurgia Nuclear -
Chefe: Prof.Dr. Tharcísio D.S. Santos

Divisão de Engenharia Química -
Chefe: Lic. Alcídio Abrao

Divisão de Engenharia Nuclear -
Chefe: Eng^o Pedro Bento de Camargo

Divisão de Operação e Manutenção de Reatores -
Chefe: Eng^o Azor Camargo Penteado Filho

Divisão de Física de Reatores -
Chefe: Prof.Dr. Paulo Saraiva de Toledo

Divisão de Ensino e Formação -
Chefe: Prof.Dr. Rui Ribeiro Franco

FABRICACIÓN DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES
PARA REACTORES DE INVESTIGACIONES (§)

Tharcísio Damy de Souza Santos⁽¹⁾
Heliton Motta Haydt⁽²⁾
Clauer Trench de Freitas⁽³⁾
Erberto Francisco Gentile⁽⁴⁾
José Deodoro Trani Capocchi⁽⁴⁾
Sebastião Hermano Leite Cintra⁽⁴⁾

R E S U M E N

Se describen los trabajos realizados en la División de Metalurgia del Instituto de Energía Atómica, de desarrollo y fabricación de elementos combustibles para reactores nucleares de pesquisa. Los trabajos comprendieron extensas investigaciones experimentales sobre las características metalúrgicas de los materiales empleados, UO₂, U₃O₈ y aleaciones de aluminio, casi todos producidos en el Brasil, así como el desarrollo de los procesos de fabricación de los elementos combustibles y el proyecto y construcción de muchos de los hornos y aparatos necesarios.

Se describen, la fabricación de los elementos combustibles, para el conjunto sub-crítico "Re-Suco", constituidos por pastillas de UO₂ natural con revestimiento de tubo de aleación de aluminio; y la producción de los elementos combustibles para el reactor "Argonauta", conjuntos de placas constituidas de núcleo conteniendo uranio enriquecido a 19,91% U-235 en la forma de U₃O₈ en dispersión con aluminio. Se resumen, finalmente, trabajos de desarrollo de otros tipos de elementos combustibles en placas, comprendiendo:

- a) placas delgadas con apenas 1,2 mm de espesura y con núcleo de "cermet".
- b) placas con "cermets" Al-U₃O₈ conteniendo hasta 75% U₃O₈.
- c) placas conteniendo varios "cermets", y
- d) placas, revestidas aun por aleaciones de aluminio, con núcleos de aleaciones ... Al-U.

-
- (§) Trabajo presentado a la Segunda Asamblea General del Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, Madrid, Junio 1969 e discutido pelo Prof. Tharcísio Damy de Souza Santos.
- (1) Jefe de la División de Metalurgia Nuclear, I.E.A., São Paulo, Brasil; Profesor Catedrático y Jefe del Depto. de Metalurgia, Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo.
 - (2) Ingeniero Metalúrgico, M.Sc; División de Metalurgia Nuclear del Instituto de Energía Atómica, São Paulo, Brasil.
 - (3) Ingeniero Civil e Ingeniero Nuclear; División de Metalurgia Nuclear, IEA; actualmente en Misión de Estudio en la División de Metalurgia, Argonne National Laboratory, Argonne, .. Illinois, Estados Unidos de Norte América.
 - (4) Ingeniero Metalúrgico; División de Metalurgia Nuclear, IEA, São Paulo, Brasil.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las actividades importantes de Instituciones dedicadas al desarrollo de las aplicaciones de la energía nuclear es la referente a los estudios de materiales nucleares con vistas a la fabricación de elementos combustibles para reactores. Esos desarrollos posibilitan, por un lado, la construcción de conjuntos subcríticos y de reactores de investigación, esenciales para los trabajos de utilización de la energía nuclear; y por otro, constituyen el medio de acumulación gradual de experiencia en esa importante rama de la metalurgia.

Con esos objetivos, se constituyó en enero de 1962 la División de Metalurgia Nuclear en el Instituto de Energía Atómica. En la misma ocasión fue organizada la División de Ingeniería Química, para ampliar los trabajos que habían sido hechos en la División de Radioquímica, en planta piloto, de purificación, a nivel de pureza nuclear, de sal de uranio, producida en el país a partir de concentrados de monazita.

En esta contribución se resumen los trabajos realizados hasta el presente, que comprenden la fabricación de los elementos combustibles para el conjunto subcrítico "Re-Suco" y para el reactor "Argonaut". El conjunto subcrítico "Re-Suco", que se encuentra en funcionamiento en la Universidad Federal de Pernambuco, en Recife, fue totalmente proyectado en el Instituto de Energía Atómica y sus partes estructurales fueron construídas en colaboración con una firma de San Pablo; todos los elementos combustibles fueron fabricados, esencialmente, con una malla exagonal de 63 mm de lado del triángulo equilátero, siendo cada vértice ocupado por un elemento combustible, cilíndrico, constituído por un apilamiento de pastillas UO_2 de 40,2 mm de diámetro, insertadas en tubo de aleación de aluminio. Todo ese conjunto está sumergido en agua de sionizada, la cual sirve como moderador y reflector de neutrones. Dos soluciones distintas fueron previstas, una utilizando fuente

FABRICACIÓN DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES
PARA REACTORES DE INVESTIGACIONES (§)

Tharcísio Damy de Souza Santos⁽¹⁾
Heliton Motta Haydt⁽²⁾
Clauer Trench de Freitas⁽³⁾
Erberto Francisco Gentile⁽⁴⁾
José Deodoro Trani Capocchi⁽⁴⁾
Sebastião Hermano Leite Cintra⁽⁴⁾

R E S U M E N

Se describen los trabajos realizados en la División de Metalurgia del Instituto de Energía Atómica, de desarrollo y fabricación de elementos combustibles para reactores nucleares de pesquisa. Los trabajos comprendieron extensas investigaciones experimentales sobre las características metalúrgicas de los materiales empleados, UO₂, U₃O₈ y aleaciones de aluminio, casi todos producidos en el Brasil, así como el desarrollo de los procesos de fabricación de los elementos combustibles y el proyecto y construcción de muchos de los hornos y aparatos necesarios.

Se describen, la fabricación de los elementos combustibles, para el conjunto sub-crítico "Re-Suco", constituidos por pastillas de UO₂ natural con revestimiento de tubo de aleación de aluminio; y la producción de los elementos combustibles para el reactor "Argonauta", conjuntos de placas constituidas de núcleo conteniendo uranio enriquecido a 19,91% U-235 en la forma de U₃O₈ en dispersión con aluminio. Se resumen, finalmente, trabajos de desarrollo de otros tipos de elementos combustibles en placas, comprendiendo:

- a) placas delgadas con apenas 1,2 mm de espesura y con núcleo de "cermet".
- b) placas com "cermets" Al-U₃O₈ conteniendo hasta 75% U₃O₈.
- c) placas conteniendo varios "cermets", y
- d) placas, revestidas aun por aleaciones de aluminio, con nucleos de aleaciones ... Al-U.

(§) Trabajo presentado a la Segunda Asamblea General del Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, Madrid, Junio 1969 e discutido pelo Prof. Tharcísio Damy de Souza Santos.

- (1) Jefe de la División de Metalurgia Nuclear, I.E.A., São Paulo, Brasil; Profesor Catedrático y Jefe del Depto. de Metalurgia, Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo.
- (2) Ingeniero Metalúrgico, M.Sc; División de Metalurgia Nuclear del Instituto de Energía Atómica, São Paulo, Brasil.
- (3) Ingeniero Civil e Ingeniero Nuclear; División de Metalurgia Nuclear, IEA; actualmente em Misión de Estudio en la División de Metalurgia, Argonne National Laboratory, Argonne, .. Illinois, Estados Unidos de Norte América.
- (4) Ingeniero Metalúrgico; División de Metalurgia Nuclear, IEA, São Paulo, Brasil.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las actividades importantes de Instituciones dedicadas al desarrollo de las aplicaciones de la energía nuclear es la referente a los estudios de materiales nucleares con vistas a la fabricación de elementos combustibles para reactores. Esos desarrollos posibilitan, por un lado, la construcción de conjuntos subcríticos y de reactores de investigación, esenciales para los trabajos de utilización de la energía nuclear; y por otro, constituyen el medio de acumulación gradual de experiencia en esa importante rama de la metalurgia.

Con esos objetivos, se constituyó en enero de 1962 la División de Metalurgia Nuclear en el Instituto de Energía Atómica. En la misma ocasión fue organizada la División de Ingeniería Química, para ampliar los trabajos que habían sido hechos en la División de Radioquímica, en planta piloto, de purificación, a nivel de pureza nuclear, de sal de uranio, producida en el país a partir de concentrados de monazita.

En esta contribución se resumen los trabajos realizados hasta el presente, que comprenden la fabricación de los elementos combustibles para el conjunto subcrítico "Re-Suco" y para el reactor "Argonaut". El conjunto subcrítico "Re-Suco", que se encuentra en funcionamiento en la Universidad Federal de Pernambuco, en Recife, fue totalmente proyectado en el Instituto de Energía Atómica y sus partes estructurales fueron construídas en colaboración con una firma de San Pablo; todos los elementos combustibles fueron fabricados, esencialmente, con una malla exagonal de 63 mm de lado del triángulo equilátero, siendo cada vértice ocupado por un elemento combustible, cilíndrico, constituído por un apilamiento de pastillas UO_2 de 40,2 mm de diámetro, insertadas en tubo de aleación de aluminio. Todo ese conjunto está sumergido en agua de sionizada, la cual sirve como moderador y reflector de neutrones. Dos soluciones distintas fueron previstas, una utilizando fuente

de neutrones, localizada en el centro del exágono, y otra, empleando un haz de neutrones procedentes del acelerador Van der Graaff; en este caso, existen 8 elementos combustibles, llamados "especiales", dotados de un orificio para el paso del tubo de aluminio, dentro del cual es colimado el haz de neutrones.

En el proyecto de ese conjunto subcrítico se procuró, deliberadamente, utilizar pastillas de densidad relativamente baja, a fin de reducir los costes de fabricación, y principalmente, no dificultar el ulterior reaprovechamiento del uranio contenido. Además de esos objetivos, esa característica resultó de las condiciones de proyecto para la geometría fijada.

Otro capítulo se dedica a la descripción sumaria de los procesos de fabricación de elementos combustibles para el reactor "Argonauta", construido en Río de Janeiro por una firma para la Comisión Nacional de Energía Nuclear, e instalado en el nuevo Instituto de Energía Nuclear, Universidad Federal do Río de Janeiro. Se recuerda aquí que ese tipo de reactor fue desarrollado en el "Argonne National Laboratory", de Argonne, Illinois, Estados Unidos, y su nombre deriva de "Argonne Nuclear Assembly for University Training", o CP-11. El proyecto del reactor fue recibido de aquel renombrado centro de investigaciones nucleares. Está constituido esencialmente por un cubo de grafito, dotado de centro anular, en el cual se hallan insertados seis elementos combustibles, cada cual dotado de 17 placas paralelas, encerrando un núcleo central de dispersión de U_3O_8 , con cerca de 20% de enriquecimiento en uranio U-235, en aluminio, y el "cermet" resultante siendo también revestido por aleación de aluminio.

Los elementos combustibles fueron totalmente fabricados por la División de Metalurgia Nuclear, a partir de U_3O_8 a 19,91% de enriquecimiento, recibido de la "United States Atomic Commission" dentro del programa de cooperación "Átomos para la Paz". Los elementos combustibles fueron expedidos el 27 de octubre de 1964 y el

reactor entró en funcionamiento el día 20 de febrero de 1965. Fueron construidos los 6 elementos completos, de 17 placas cada uno, así como 2 elementos combustibles más, iguales en cuando a todas las demás características, pero conteniendo uranio natural, en lugar de uranio enriquecido. Naturalmente, todos los trabajos preliminares y toda la extensa investigación experimental de las variables en juego, fueron hechos utilizando U_3O_8 natural, obtenido en la División de Metalurgia Nuclear por descomposición de diuranato amónico, del origen ya citado. Cada una de las placas contenía $21,0 \pm 0,2$ g de U-235 en "cermet" de 54,36% U_3O_8 - 45,64% Al; se recuerda aquí que el proyecto original preveía un contenido de apenas 19,3 g de U por placa. La carga total utilizada de U_3O_8 , enriquecida a 19,91%, fue de 10.745,3 g, conteniendo 2.139,4 g de U-235. Con casi cuatro años de utilización, en el momento en que se prepara este trabajo, los elementos combustibles fabricado no han presentado defecto alguno que haya sido constatado en su uso.

De acuerdo con la experiencia obtenida, fueron introducidos nuevos perfeccionamientos en elementos combustibles planos, también revestidos con aleación 1100 de aluminio y dotados de "cermets" de dispersión U_3O_8 -Al, en el sentido de: a) producir elementos combustibles delgados (hasta 0,7 mm de espesor total, comprendiendo núcleo de 0,46 a 0,48 mm); b) elementos combustibles de 2,45 mm de espesor y conteniendo núcleos de "cermets" de 55 hasta 75% de U_3O_8 , así como de 1,31 mm de espesor y teniendo núcleo de 65% de U_3O_8 ; y por fin, c) placas dotadas de dos o de cuatro "cermets", de 45% U_3O_8 - 55% Al, con objeto de aumentar la resistencia a los esfuerzos originados por las fluctuaciones térmicas y reducir el riesgo de contaminación en el caso de existir ruptura localizada del revestimiento.

Por último, describen los autores los trabajos referentes a la fabricación de elementos combustibles planos, dotados de núcleos de aleaciones aluminio-uranio, igualmente revestidos por aleaciones de aluminio, 1100 a 8001. Dos técnicas vienen siendo

adoptadas con éxito para evitar el habitual combamiento terminal del núcleo: tratamientos isotérmicos para globulización del eutéctico, y adiciones de bajos contenidos de silicio para evitar la reacción peritética UAl_3-UAl_4 .

2. ELEMENTOS COMBUSTIBLES DE UO_2 PARA EL CONJUNTO "RE-SUCO"

El UO_2 destinado a las pastillas fue producido en la División de Metalurgia Nuclear a partir de diuranato amónico, de pureza nuclear; esa sal fue suministrada por la División de Radioquímica del Instituto de Energía Atómica y fue producida en una pequeña instalación piloto.

Los diversos problemas encontrados en el desarrollo de los estudios experimentales y durante la fabricación, fueron objeto de diversas publicaciones por los autores (1, 2, 3, 4, 5).

La sal recibida fue inicialmente sometida a calcinación para transformarla en U_3O_8 , operación que fue realizada en hornos eléctricos de mufla, a la temperatura de $875^{\circ}C$ durante tres horas, siendo colocada la carga de diuranato amónico en bandejas de hierro fundido, resistente al calor y conteniendo 26 a 28% de Cr. A causa de la humedad contenida en la sal bruta recibida, el rendimiento medio obtenido fue de 660 g de U_3O_8 por kilogramo de diuranato amónico cargado, en el estado en que fue recibido. El calcinado se presentaba bajo la forma de sal negra, suelto, y la contaminación por cascarillas de óxido, desprendidas de las bandejas, nunca alcanzó valores superiores a 5 ppm en cromo.

La reducción del U_3O_8 a UO_2 se efectuó en dos hornos tubulares, eléctricos, en atmósfera de hidrógeno, a $700^{\circ}C$, y durante el paso de la carga, contenida en navéculas de grafito, por la mufla tubular. Los hornos fueron proyectados por la División de Metalurgia Nuclear y construídos en San Pablo por la firma Combustol Industria y Comercio Ltda. Su comportamiento en uso, durante casi cinco años, viene siendo plenamente satisfactorio. El horno dispo-

ne de dos zonas de control independientes de la temperatura, por reguladores-indicadores "Engro", también fabricados en San Pablo.

La figura 1 muestra el aspecto de uno de los hornos de reducción, viéndose la extremidad dotada de camisa de agua para refrigeración de la carga reducida. Los hornos funcionan bajo presión positiva de hidrógeno (lo que asegura bajo consumo) y las cámaras de las extremidades, tanto de carga como de descarga, reciben argón en las ocasiones en que se abren las tapas correspondientes. de esa forma se evita el quemado del hidrógeno o las pequeñas explosiones eventuales, al mismo tiempo que no se produce ninguna inflamación del UO_2 pirofórico reducido. En general, los valores del índice O/U se situaron en torno a 2,06.

Para la obtención de elevadas densidades de las pastillas de 40,2 mm de diámetro, bajo presiones bajas de compactación, fue necesario mejorar considerablemente las condiciones de compacidad de las cargas. Por eso, las operaciones de acondicionamiento y de homogeneización de las mismas fueron cuidadosamente estudiadas y realizadas en molinos de bolas de acero, revestidos internamente con goma vulcanizada. Con esas operaciones, realizadas en general durante 24 horas, los polvos, que antes daban una densidad en verde variable entre 1,6 y 2,0 g/cm^3 , pasaron a 4,04 - 4,40 g/cm^3 , lo que indica una sustancial mejora de la compacidad.

Para mejorar esa compacidad y al mismo tiempo evitar la formación de las fisuras de borde, importantes principalmente en relación con las dimensiones de las pastillas y de su masa, se empleó 1,5% de alcanfor (en la forma de solución alcohólica) y 0,25% de estearato de zinc, éste como lubricante.

La operación de compactación de las pastillas se realizó en matrices fluctuantes, construídas en acero rápido, en prensas hidráulicas y bajo presiones variables entre 1,6 y 2,4 t/cm^2 . Los valores de la densidad aparente media de las pastillas en el esta

do compactado estaban en torno a $6,966 \text{ g/cm}^3$, con una desviación mé \acute{d} ia de $0,068 \text{ g/cm}^3$. Esos fueron los valores registrados en el transcurso de la fabricaci \acute{o} n de 6.888 pastillas, que fueron utilizadas en el montaje de los elementos combustibles.

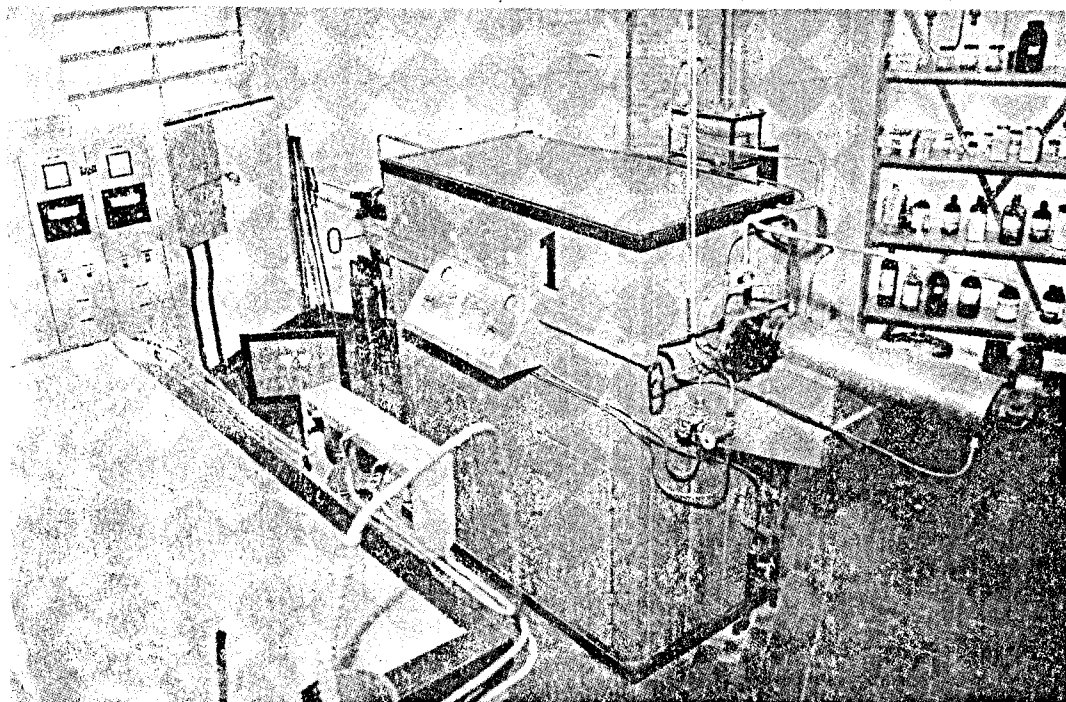


Fig. 1 - Vista de uno de los hornos el \acute{e} ctricos para la reducci \acute{o} n por hidr \acute{o} geno de U_3O_8 a UO_2 . La extremidad en el primer plano est \acute{a} dotada de camisa de agua para refrig \acute{e} raci \acute{o} n de carga reducida. Al fondo el p \acute{a} nel de control, con dos zonas independientes de calentamiento.

Para eliminar el aglomerante y disociar parcialmente el lubricante, se hizo un tratamiento a 35°C , de 3 a 5 horas, en atm \acute{o} sfera de nitr \acute{o} geno. Con ese tratamiento la densidad desciende un poco. Los valores finales se situaron, para todas las pastillas producidas, en torno a $6,886 \pm 0,055 \text{ g/cm}^3$.

El revestimiento est \acute{a} constituido por un tubo de aleaci \acute{o} n de aluminio 1100, cerrado por la parte superior por un tap \acute{o} n de la misma aleaci \acute{o} n e inferiormente por una pieza c \acute{o} nica, terminada en un trozo cil \acute{i} ndrico que se apoya en la placa-gu \acute{i} a inferior, tambi \acute{e} n de la misma aleaci \acute{o} n. Los tubos y barras de aluminio fueron producidos por la Compa \acute{n} ia Brasileira de Al \acute{u} minio, con la siguiente es-

pecificación: Cu 0,2% max, Si + Fe 1,0% max, Mn 0,05% max, Zn 0,10% max y otros (suma) max 0,15%.

La figura 2 ilustra los principales detalles de los elementos combustibles normales. El cierre por la tapa superior y por el extremo ligado al tubo inferior para apoyo en la placa-guía, se hace por doble cierre prensado. Los tubos, antes de ser cargados con las pastillas, fueron sometidos a ensayos de presión interna y nuevamente ensayados después de cargados y efectuado el cierre herético en la tapa superior. Para mayor seguridad en la estanqueidad, fueron aplicadas capas de "araldite" en las zonas de cierre.

La carga de los tubos se hizo mediante la introducción de las pastillas, las cuales ocupan una altura de $93,0 \pm 0,3$ mm en los elementos comunes; esa altura útil de las pastillas se reducía a $80,0 \pm 0,3$ mm en los elementos "especiales".

Las tablas I y II reúnen los datos principales referentes a los elementos combustibles normales y especiales, y al conjunto de todos los elementos combustibles, respectivamente.

Después de ejecutados todos los ensayos de los elementos combustibles cerrados, estos fueron sometidos a tratamiento de "alodización", utilizando el producto "Alodine-1200" de la Amschen Products, Estados Unidos, que tiene por finalidad producir una película de cromatos insolubles, llamados "amorfo", de 1,5 a 9 mg/cm². Esa película aumenta sensiblemente la resistencia a la corrosión por el agua desionizada, existente en el tanque del reactor subcrítico, y que, como se dijo, funciona como reflector y moderador de los neutrones.

La figura 3 muestra dos elementos combustibles, uno de los cuales es del tipo "especial" colocado en placa de ensayo, de geometría, construcción y características exactamente iguales a las de placa existente en el tanque del conjunto subcrítico "Re-Suco". Todas las piezas estructurales mostradas son de aluminio 1100. Obsérvese el perfecto orden de posiciones de los elementos combusti-

bles, esencial para dejar el espacio previsto para el paso de los elementos contadores de flujo.

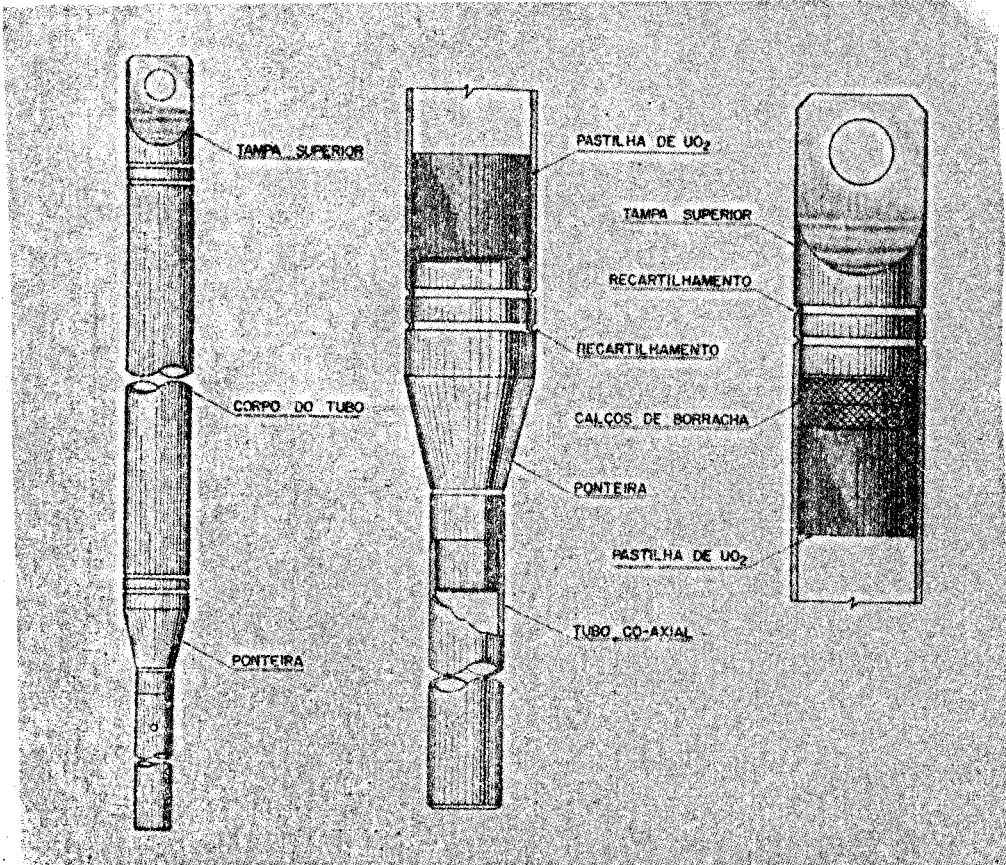


Fig. 2 - Detalhes principais do tubo de revestimento e de las piezas de cierre y de guía de los elementos combustibles.

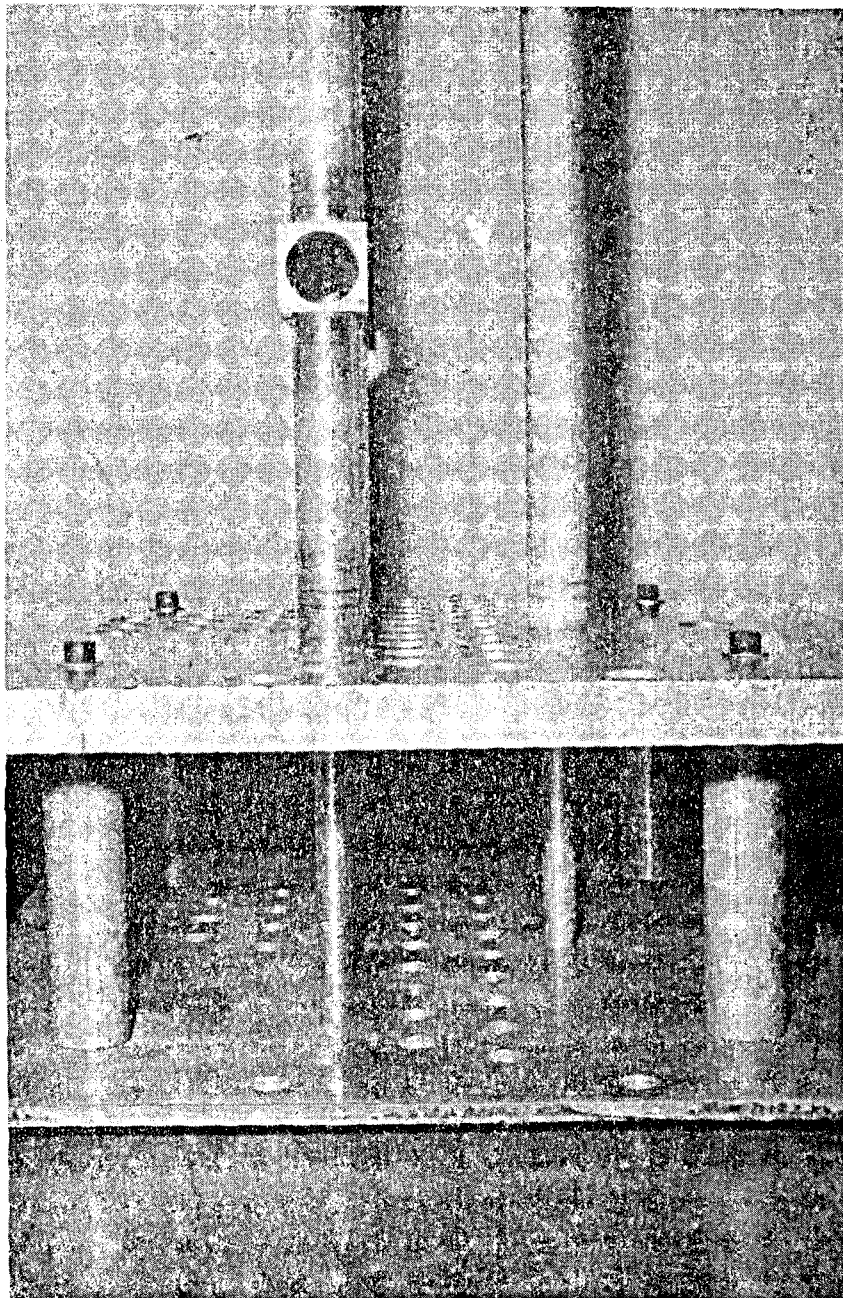


Fig. 3 - Fotografía mostrando un elemento combustibles normal (a la derecha) y uno "especial" (a la izquierda) en placa para medida de los elementos combustibles. Obsérvese la placa guía y la placa base, dispuestas de manera que asegura la perfecta verticalidad de los elementos combustibles, permitiendo a los contadores pasar libremente.

T A B L A I

Media y desvío padron de los datos característicos de los elementos combustibles normales y especiales

característicos	elementos combustibles normales	elementos combustibles especiales
masa total, g	9.376,8 ± 49,9	8.762,0 ± 5,0
masa de UO ₂ , g	8.100,6 ± 50,6	7.157,2 ± 14,1
masa de Aluminio, g	1.267,4 ± 74,5	1.686,4 ± 5,1
masa calces de goma, g	8,832 ± 0,599	18,871 ± 0,980
altura de columna de UO ₂ en	93,00 ± 0,09	80,12 ± 0,12
relación U/Al	5,631 ± 0,055	3,690 ± 0,014
densidad media de la columna de UO ₂ , g/cm ³	8,86 ± 0,04	6,94 ± 0,01

T A B L A II

Datos Globales Referentes a la Carga de Elementos Combustibles Normales y Especiales

característicos	elementos combustibles normales	elementos combustibles especiales	t o t a l
número de elementos	258	8	266
número de pastillas normales	6.707	181	6.888
número de pastillas especiales	253	8	261
masa total, kg	2.419,2	70,10	2.489,3
masa de UO ₂ , kg	2.090,0	56,46	2.146,46
masa de aluminio, kg	327,0	13,49	340,49
altura de la columna de UO ₂	239,93	6,410	246,34
masa de uranio contenido, kg	1.841,4	49,77	1.891,17

3. ELEMENTOS COMBUSTIBLES CON URANIO ENRIQUECIDO PARA EL REACTOR "ARGONAUTA"

Se realizaron extensos estudios experimentales para la fabricación de las placas de elementos combustibles con núcleo de dispersión U_3O_8 -Al, empleándose en esos estudios U_3O_8 resultante de la descomposición del diuranato amónico, y de concentración natural en isotopo fisionable. Solamente después de que todas las variables fueron perfectamente controladas, se pasó a producir los elementos combustibles con uranio enriquecido, habiéndose producido anteriormente diversos elementos combustibles completos, pero con uranio natural.

El proceso adoptado para la fabricación de las placas fue el de co-laminación, que consiste esencialmente en producir por laminación en caliente, la unión de un conjunto constituido por las dos chapas de aluminio, que irán a formar el revestimiento de las placas, con la placa central, también de aluminio, y dentro de la cual se insertó, como en una moldura, el "cermet", constituido de una dispersión de U_3O_8 y polvo de aluminio. El elevado contenido de U_3O_8 en el "cermet", que alcanzó 54,36% en las placas producidas con uranio enriquecido, introduce grandes dificultades en cuanto al comportamiento plástico del núcleo en las operaciones de laminación, tanto en caliente como en frío. Además es de gran importancia que se consiga una perfecta y continua unión entre el "cermet" y la placa de aluminio del revestimiento.

Los diversos aspectos de los problemas metalúrgicos afrontados durante la fase experimental, y posteriormente en la fase de fabricación, fueron igualmente objeto de diversas publicaciones por los autores (6, 7, 8, 9).

Conviene observar que otros reactores "Argonauta", a partir del primero, desarrollado en el "Argonne National Laboratory", emplean elementos combustibles constituidos por chapas obtenidas

por co-extrusión. Ese proceso trae como consecuencia que el núcleo quede expuesto en las extremidades cortadas de la tira, relativamente larga, obtenida por la extrusión; esa exposición es atenuada después por la aplicación de un revestimiento protector. Sin embargo ese revestimiento constituye siempre un punto dudoso y capaz de ocasionar la entrada de agua, lo que provoca la inutilización rápida del elemento combustible y la pérdida del uranio enriquecido contenido.

Para mejorar las características del reactor "Argonauta" y para disminuir la masa total de U-235 en cada placa, disminuyéndose con ello la masa de aluminio. Así, en lugar de 19,3 g de U-235, se elevó el contenido a 21,0 g por chapa. Con esa alteración fue necesario aumentar a 54,36% el contenido de U_3O_8 en el "cermet", cuando en los primitivos elementos combustibles hechos en Argonne el contenido era sólo de 39%. Conforme se mostrará más adelante, en la División de Metalurgia Nuclear, en la continuación de esos procesos se han producido placas con "cermets" de hasta 75% de U_3O_8 y apenas 25% de Al.

Las principales especificaciones de elementos combustibles con uranio enriquecido para el reactor "Argonauta" están condensadas en la Tabla III.

Se describen a continuación las principales operaciones de fabricación de elementos combustibles.

3.1 PREPARACIÓN DE LAS CARGAS U_3O_8 -Al

La determinación de las características propias de las cargas de U_3O_8 enriquecido a 19,91% U-235, recibido de la "United States Atomic Energy Commission", se hizo con extremo cuidado, a fin de reducir al mínimo las pérdidas eventuales. Después de trazadas todas las curvas características de las principales propiedades en juego, de compactación y de sinterización, en función de las variables del proceso, se desintegraron los compactados y "cer-

mets" para su ulterior utilización en la fabricación de las placas para los elementos combustibles.

T A B L A III

Principales Especificaciones de los Elementos Combustibles "Argonauta"

característica	valor
número de elementos combustibles	6
número de chapas en cada elemento combustible	17
espesor de las chapas (mm)	2,43 ± 0,02
espesor nominal del revestimiento en cada face (mm)	0,28
espesor nominal del núcleo del "cermet" después del acabado de la chapa (mm)	1,87
radio del núcleo del "cermet" después del acabado de la chapa (mm)	65,75 ± 0,15
longitud total de las chapas después de acabadas (mm)	610,00 ± 0,50
longitud total del núcleo de "cermet" después del acabado de la chapa (mm)	602,00 ± 5,0
composición del "cermet" (% U ₃ O ₈)	54,36
composición del "cermet" (% Al)	45,64
tamaño de las partículas de U ₃ O ₈ (microns)	- 44
tamaño de las partículas del polvo de aluminio (microns)	-147
porcentaje de U-235 en el U ₃ O ₈	19,91
masa máxima de Al por chapa (g)	225
masa de U-235 por chapa (g)	21,0 ± 0,2
distribución media de U-235 por unidad de área en chapa pronta (g/cm ²)	0,051

A fin de reducir al mínimo las pérdidas de manipulación, el pesado de todas las cargas se realizó siempre en cajas de guantes y en balanza Mettler de 1 mg de lectura. Las cargas constituidas por 54,36% de U₃O₈ y 45,64% de polvo de Al, que pase por tamiz de 100 mallas por pulgada, fueron pesadas cuidadosamente y colocadas en recipientes cilíndricos de cloruro de polivinilo, con bolas de gomas duras. El acondicionamiento se hizo durante 48 horas.

3.2 COMPACTACIÓN

La compactación para formar los "cermets" prismáticos, de base rectangular, se hizo en matriz especialmente construída en acero de 12% Cr y 2% C, en prensa hidráulica de 100 t de esfuerzo máximo, bajo presión de $0,923 \text{ t/cm}^2$; para los "cermets" de idéntica composición, pero de U_3O_8 natural, esa presión se redujo a $0,692 \text{ t/cm}^2$ para producir compactos de la misma densidad aparente, en el estado compactado de $3,15 \text{ g/cm}^3$.

Las pérdidas totales de manipulación de las cargas hasta la producción de los "cermets", analizadas cuidadosamente, fueron de apenas 13 mg de U_3O_8 y esto para la producción de los 102 compactos necesarios para la fabricación de los 6 elementos combustibles, de 17 placas cada uno.

3.3 PRE-SINTERIZACIÓN

Los cuerpos compactados fueron pre-sinterizados en un horno eléctrico de mufla, en atmósfera de argón a 580°C . Esas operaciones se realizaron en horno eléctrico, dotado de dos zonas independientes de control de temperatura.

En la figura 4 se muestra la operación de introducción de una de las navecillas de grafito, conteniendo los "cermets" de uranio enriquecido, en el horno.

Las dimensiones finales de los "cermets", después de la pre-sinterización, eran las siguientes: longitud $100,90 \pm 0,15 \text{ mm}$, ancho $65,76 \pm 0,75 \text{ mm}$ y altura $11,30 \pm 0,09 \text{ mm}$. Para evitar pérdidas eventuales en esa operación, los "cermets" fueron envueltos en papel de aluminio, con objeto de que el posible roce con las paredes del horno no produjera pérdidas de óxido enriquecido.

3.4 MONTAJE DE LOS CONJUNTOS Y SOLDADURA

Los "cermets" fueron envueltos posteriormente en papel de aluminio de $0,012 \text{ mm}$ de espesor. El peso de aluminio para ese en-

voltorio era de 0,98 g.

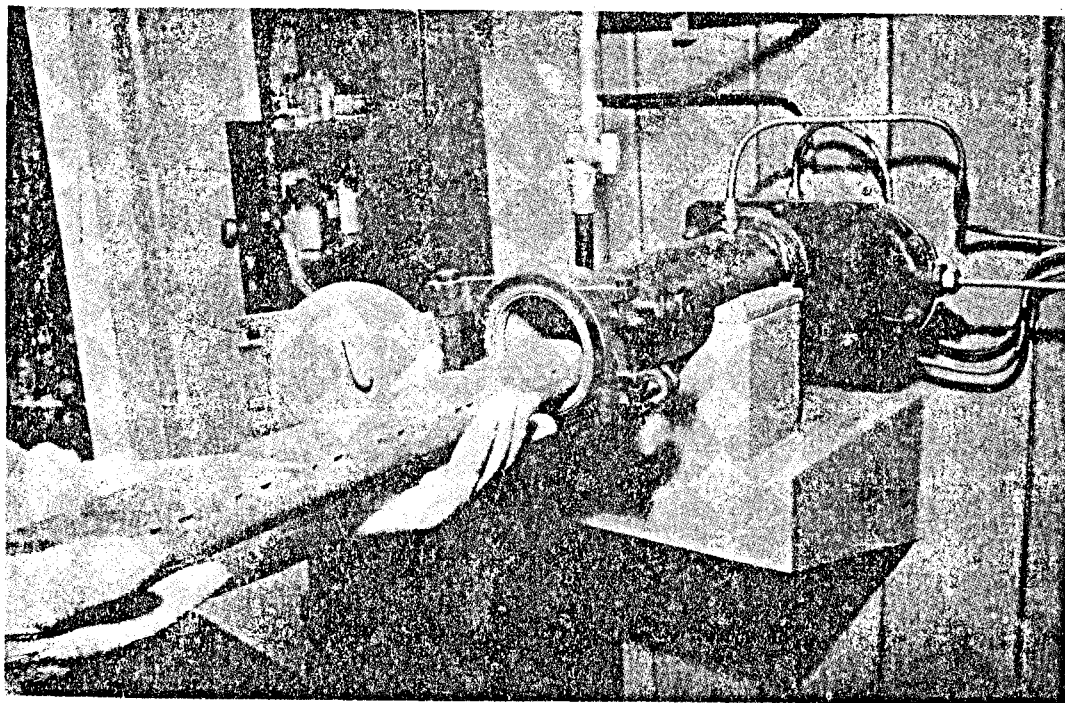


Fig. 4 - Carga de una navecilla con varios "cermets" en el horno continuo de presinterización, en atmósfera de argón.

Conviene llamar la atención sobre el hecho de que se comprobó la necesidad de mantener rigurosamente dentro de límites rígidos, los espesores de las chapas y de la moldura, así como del "cermet", para que las placas obtenidas estuvieran dentro de los límites impuestos por la especificación. La Tabla IV reúne los datos característicos de algunos de los "cermets". A fin de generalizar los resultados, con auxilio del computador IBM-1620-II del Instituto de Energía Atómica, se determinó la siguiente fórmula semi-empírica, que tiene en cuenta también la influencia de E, espesor de la chapa de la moldura. La expresión obtenida es la siguiente:

$$c_i = 97,2 (E + 2e)/h_t - 99,1 (E - h_s)$$

donde e es el espesor de la chapa de revestimiento (mm), h_t la al

tura final de la chapa acabada y h_s la altura del "cermet" después de la pre-sinterización.

Solo manteniendo rígidamente los espesores finales de las placas ($2,43 \pm 0,02$ mm) dentro de los límites de la especificación, fue posible garantizar las dimensiones finales para el núcleo en la placa acabada.

T A B L A IV

Dimensiones de "cermets" a moldura y en las chapas laminadas

Nº del "cermet"	201	202	203	204
Espesor de la chapa del núcleo mm	12,0	12,2	12,3	12,2
Espesor de la chapa del revestimiento mm	2,0	2,0	2,0	2,0
Altura del "cermet" pre-sinterizado mm	11,38	11,46	11,85	12,00
Densidad del "cermet" g/cm ³	3,02	3,04	3,05	3,01
Longitud del núcleo laminado mm	570	585	605	617
Altura final de chapa acabada mm	2,45	2,45	2,48	2,46

3.5 LAMINACIÓN DE LOS CONJUNTOS

Los conjuntos, después de ser soldados previamente bajo arco de argón, fueron sometidos a laminación, inicialmente en caliente para caldeoamiento por difusión, y en seguida en frío, para obtener las dimensiones deseadas conforme a la especificación.

El calentamiento se realizó en horno eléctrico de mufla, a 580°C, con dispositivos especiales para asegurar la reproducibilidad de las condiciones de calentamiento, y durante un tiempo de 45 minutos; los recocidos intercalados entre las secuencias de pasadas se hicieron siempre durante 10 minutos, y el recocido final, después de alcanzado el espesor deseado en la laminación en frío ,

se hizo siempre durante 45 minutos, inclusive como "blister test", para evitar la eventual formación de burbujas, caso de existir defectos en la unión entre el material del revestimiento y el "cermet" deformado en la laminación.

Las operaciones de laminación se realizaron en un laminador de precisión "Stannat-Mann", accionado por un motor de 20 HP y de velocidad variable. Los conjuntos se laminaron en caliente hasta un espesor final de 3,40 mm y en seguida fueron recocidos durante 10 minutos. La secuencia adoptada comprendía la laminación en caliente con reducción del 59%, seguida de recocido, nueva laminación en caliente con 61% de reducción, nuevo recocido, después del cual se cortó el material; laminado en frío con 30% de reducción, seguido de recocido y laminado en frío final hasta el espesor indicado, siguiendo el recocido del ensayo de formación de ampollas.

Antes de los últimos ensayos no destructivos y de las radiografías, las placas se prepararon cuidadosamente y después fueron decapadas por ácido, seguido de doble lavado. La figura 5 muestra algunos aspectos de esas últimas operaciones.

3.6 DIMENSIONES Y PESAJE FINAL DE LAS PLACAS

Una vez obtenidas las radiografías finales y concluido el ensayo de verificación de la homogeneidad del núcleo, las chapas fueron sometidas a la operación de punzonado para hacer la abertura a través de la cual se introducen los espaciadores confeccionados en lucite. Dentro de ellos van los tornillos en aleación 75ST6 para el cierre del conjunto. En la operación de punzonado se recuperaron cuidadosamente los discos que encerraban la parte correspondiente del núcleo.

La Tabla V reúne los datos referentes a 10 placas producidas con uranio enriquecido, mostrando la buena reproducibilidad conseguida en los resultados.

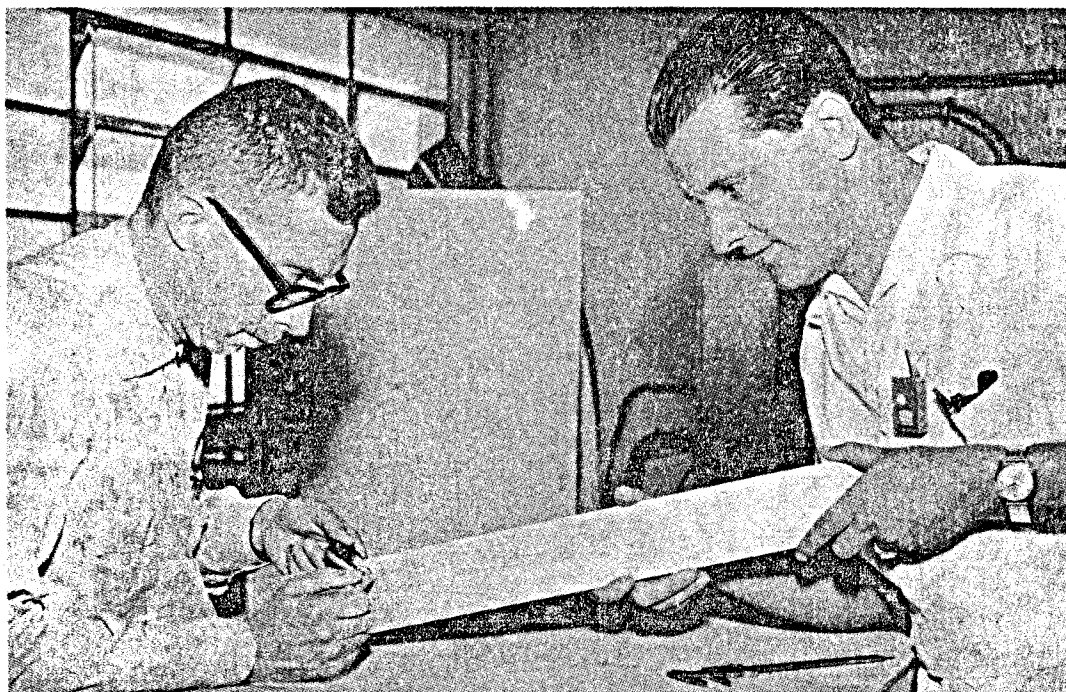


Fig. 5 - Verificación de los espesores de las placas laminadas durante las últimas pasadas de laminación en frío. La fotografía muestra una placa experimental, con "cermet" de U_{308} natural.

3.7 CONTROL DE RADIOGRAFIAS FINALES Y DE HOMOGENEIDAD

Las 102 placas producidas, con los 102 "cermets" fabricados, así como cerca de 70 placas producidas con uranio natural fueron radiografiadas en ambas extremidades, para una perfecta delimitación del núcleo, efectuándose un barrido mediante un "tracer scanner", dotado de un servomecanismo que permitía deslizar el contador de forma que cubriese una zona de 50 cm de longitud y de 3 mm de ancho, con velocidad regulable. Se sometió cada una de las chapas producidas a estos ensayos, a fin de verificar la homogeneidad del núcleo. El contador utilizado fue un Geiger tubular de 1 cm de diámetro, con colimador de plomo de 3 x 3 mm; la velocidad de deslizamiento se mantuvo en 2,1 mm/s.

No se rechazó ninguna de las 102 placas producidas con uranio enriquecido. Solo 2 chapas presentaron ligera curvatura de borde, con un desvío de $09\ 14'$ de la línea recta, pero perfec-

T A B L A V

Principales Datos Referentes a las Chapas Prontas con Uranio Enriquecido

nº de la chapa	longitud del núcleo mm	espesor de la chapa mm	masa de la chapa perforada mm	U ₃₀₈ en la chapa mm	Al total g	U ₃₀₈ en la chapa %	U ₂₃₅ contenido g
265	600	2,43	333,434	124,597	208,837	37,36	20,962
266	605	2,43	332,550	124,682	207,868	37,49	20,976
267	602	2,43	333,163	124,663	208,500	27,41	20,973
268	606	2,44	332,002	124,671	207,331	37,55	20,975
269	602	2,44	332,170	124,697	207,473	37,54	20,979
270	599	2,45	334,694	124,690	210,004	37,25	20,978
271	600	2,44	333,037	124,604	208,433	37,41	20,963
272	600	2,45	333,181	124,743	208,438	37,44	20,987
273	602	2,43	331,713	124,732	206,981	37,60	20,985
274	602	2,44	332,717	124,751	207,966	37,49	20,988

tamente aceptable. Otras 2 presentaron exposición del núcleo en una extensión de 8 mm, en uno de los bordes; fueron corregidas mediante la aplicación de resina de alta resistencia en esas regiones.

La figura 6 muestra uno de los elementos combustibles producido con uranio natural, viéndose al lado del mismo algunas placas sueltas, también de uranio natural. Los elementos con uranio enriquecido eran análogos a aquellos en todos sus aspectos.

El meticuloso control de las pérdidas en cuanto a los balances de material acusó una pérdida total de 9,4 g de U, siendo apenas 1,9 g la del contenido de U-235. Como ya se ha dicho, no se perdió ningún "cermet" ni ninguna placa de elemento combustible, en todo el trabajo de fabricación.

La tabla VI reúne los datos referentes a los elementos combustibles producidos con uranio enriquecido.

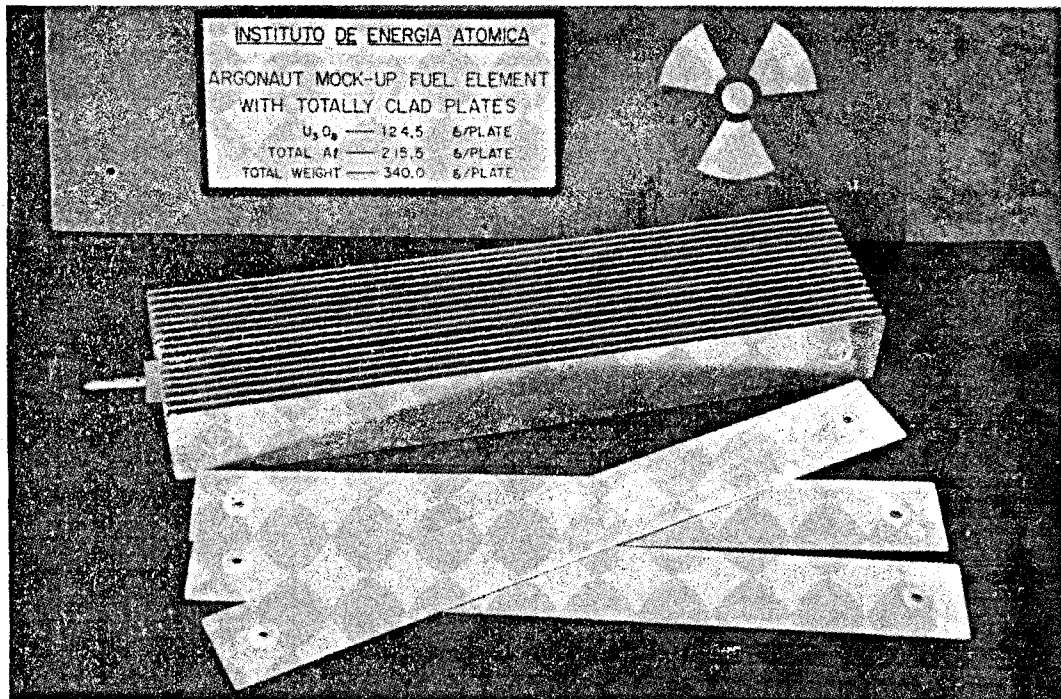


Fig. 6 - Aspecto de uno de los elementos combustibles montados, juntamente con placas sueltas. Cada elemento combustible contiene 17 placas con núcleo de 54,36 % U₃O₈ - 45,64% Al. Las placas con uranio enriquecido son idénticas en todos los detalles de construcción.

T A B L A VI

Principales Características de los Elementos Combustibles con Uranio Enriquecido

especificaciones	designación del elemento combustible					
	ENR-1	ENR-2	ENR-3	ENR-4	ENR-5	ENR-6
nº de chapas	17	17	17	17	17	17
altura total (mm)	670	670	670	670	670	670
ancho total (mm)	73	73	73	73	73	73
profundidad total (mm)	150,5	150,3	150,3	150,2	151,0	151,0
masa total (g)	5860	5860	5845	5830	5825	5825
masa total de U_3O_8 (g)	2075,545	2110,552	2118,420	2119,228	2119,228	2119,429
masa total de Al (g)	3581,966	3542,457	3529,690	3531,754	3531,122	3523,442
promedio de las espesores (mm)	2,43	2,43	2,43	2,43	2,43	2,43
promedio de las masas de las chapas (g)	332,795	332,530	332,357	332,357	332,020	331,933
promedio de las masas de U_3O_8 (g)	122,011	124,150	124,613	124,607	124,660	124,672
promedio de las masas de Al (g)	210,704	208,380	207,750	207,750	207,360	207,261

4. OTROS DESARROLLOS4.1 PLACAS DELGADAS CON "CERMETS"

Para reactores de investigación, del tipo refrigerado y moderado por agua, destinados a asegurar flujos de neutrones de alta intensidad, puede ser conveniente reducir el espesor del núcleo, de modo que baje correspondientemente la temperatura desarrollada en el plano central de la placa, bajando igualmente la temperatura de la interfase en contacto con el medio moderador.

Con esos objetivos, la División de Metalurgia Nuclear desarrolló un amplio programa de estudios experimentales de producción de placas delgadas, tanto por colaminación de conjuntos de moldura, como por la técnica de laminación de lingotes que tengan el núcleo de "cermet", desarrollada en el "Argonne National Laborato-

ry" por Bergua, Friddle, Diaz y Baird (10). Se obtuvieron resultados idénticos con estos dos procesos.

Los resultados experimentales obtenidos han comprobado la excelente unión entre el núcleo y el revestimiento, así como la inexistencia de defectos de heterogeneidad o de grietas y fisuras.

Se han producido series de placas de 1,25 a 1,31 mm de espesor total, de cerca de 650 mm de longitud y 80 mm de ancho, con núcleos de 40% U_3O_8 - 60% Al y 50% U_3O_8 - 50% Al. En estas series el revestimiento es siempre de aleación 1100 de aluminio.

Otras series de placas se produjeron con 0,7 mm de espesor total, teniendo 0,2 mm de espesor de revestimiento en cada fase y 0,3 mm de espesor del núcleo. Por el proceso de colaminación se han producido placas de 50 mm de ancho y 0,9 mm de espesor con cerca de 1500 mm de longitud.

4.2 PLACAS CON "CERMETS" DE ALTOS CONTENIDOS EN U_3O_8

Como se dijo anteriormente, la realización del programa de fabricación de las placas "Argonauta" llevó al aumento hasta 54,36% del contenido de U_3O_8 en los "cermets" del núcleo. Los dos resultados buenos obtenidos y el perfecto comportamiento plástico de esa mezcla heterogénea durante todas las operaciones metalúrgicas, comprobado por la inexistencia de defectos internos, por la perfecta geometría del núcleo en la placa laminada final y por la unión sin soluciones de continuidad entre el núcleo y el revestimiento, llevaron a los autores a estudiar, de forma sistemática, la influencia de mayores concentraciones de U_3O_8 en el núcleo.

Los resultados obtenidos mostraron que pueden fabricarse con facilidad placas conteniendo núcleos de "cermets" hasta de 75% U_3O_8 - 25% Al, con dimensiones de 360 mm x 80 mm y espesor final de 2,4 mm, con revestimiento de 0,8 mm en cada fase y núcleo de 0,8 mm. La densidad del núcleo en la placa acabada alcanza 86% de la densidad teórica de la dispersión, en las placas de 55% U_3O_8 y

75% de ese valor en las placas con 75% U_3O_8 .

En placas de 1,45 mm de espesor total con 0,47 mm de espesor de revestimiento y núcleo de 0,51 mm, conteniendo núcleo de "cermet" de 65% U_3O_8 - 35% Al, se obtuvieron densidades del núcleo deformado correspondientes a 79,5% de la densidad teórica. La homogeneidad de la distribución de U_3O_8 en el núcleo es perfecta, conforme demuestran las micrografías hechas por selección de placas laminadas.

4.3 PLACAS DOTADAS DE DOS Y CUATRO "CERMETS"

Normalmente, los combustibles placa para reactores de investigación moderados y refrigerados a agua, contienen un solo núcleo, de "cermet" o de aleación Al-U. En algunos proyectos de reactores, como en el reactor "Argonauta", ese núcleo está atravesado por los tornillos de fijación de los conjuntos, conforme se puede ver en la figura 8. Aunque los anillos de lucite y otros dispositivos, permitan aislar y proteger debidamente esa región de la interacción con el medio refrigerador, esa proximidad del núcleo constituye un punto que causa preocupación en cuanto al funcionamiento del reactor.

Tratando de evitar esa dificultad, la División de Metalurgia Nuclear realizó un programa de estudios experimentales llevando a cabo el estudio de la fabricación de elementos combustibles planos dotados de varios núcleos, que permitan que los orificios para la fijación y montaje sean mecanizados en la zona en que solo existe material de revestimiento.

Este proyecto, además de la ventaja señalada, asegura .. mayor rigidez estructural, mayor continuidad del material de revestimiento, mayor resistencia a los efectos térmicos y a los de los gases residuales, incluso los de fisión, y por fin, en el caso de una ruptura localizada del revestimiento, menor contaminación por productos radioactivos. Otra posibilidad que ofrece es el tener en una misma placa, zonas de "cermets" de composiciones

diferentes.

Los estudios experimentales (15) mostraron que pueden producirse fácilmente placas con dos, cuatro o más "cermets", con núcleos de aleaciones, de forma prismática o cilíndrica, de base elíptica, y que la geometría de distribución de esos "cermets" puede variar dentro de amplios límites, de manera que satisfaga los requisitos del proyecto del reactor.

El buen comportamiento de los conjuntos en la laminación exige, como quedó comprobado, una absoluta reproducibilidad de las características, tanto de los "cermets" como de los constituyentes de la aleación de aluminio del sistema.

4.4 PLACAS DOTADAS DE NUCLEOS DE ALEACIÓN

Las aleaciones Al-U tienen gran aplicación como núcleo de elementos combustibles de reactores de investigación, moderados a agua. Los intervalos de composición de mayor interés son los de 10 a 20% U, cuando el contenido de U-235 es de 90%. Estas aleaciones de contenido más elevado de uranio han tenido gran desarrollo, como consecuencia de que el programa "Atomos para la Paz" del Gobierno de los Estados Unidos, ha limitado al 20% el enriquecimiento del U-235 suministrado para reactores de investigación.

Los estudios realizados (16) han comprobado que el adecuado comportamiento plástico de las aleaciones de Al con 20% U puede obtenerse por medio de tratamiento térmico, causando éste una sensible disminución del valor de la microdureza. No obstante, y a pesar de existir una sensible mejoría de la plasticidad, todavía son bastante críticas las condiciones para la producción de placas planas, por el proceso de colaminación de conjuntos de moldura.

La disminución del llamado "efecto halteres" (hueso de perro), caracterizada por una pronunciada curvatura terminal del núcleo en las extremidades de las placas, puede obtenerse más fácilmente por la sustitución de la aleación del revestimiento por alea

ciones de mayor resistencia a la deformación plástica, tales como 6061, 5052 y APM-257 o por la adición de silicio, como medio para suprimir la reacción peritética de UAl_3 e UAl_4 .

Los resultados experimentales obtenidos (17) en la producción de placas de 1,45 mm de espesor, 66 mm de ancho y 310 mm de longitud, han demostrado la inexistencia de defectos del núcleo cuando se emplea aleación Al-20% U_3O_8 , 8% Si, principalmente cuando el núcleo, después de laminado a 3,2 mm de espesor, es sometido a tratamiento isotérmico.

Los exámenes radiográficos y el ensayo de formación de ampollas comprobaron la uniformidad de la geometría del núcleo y la inexistencia de soluciones de continuidad en las uniones núcleo-revestimiento.

5. CONCLUSIONES

1 - La fabricación de 266 elementos combustibles para el conjunto "Re-Suco", constituidos por pastillas de UO_2 natural introducidas en tubos de aleación de aluminio 1100, se realizó de acuerdo con los objetivos descritos, con equipo metalúrgico que, en casi su totalidad, fue proyectado y construido en São Paulo. Se produjeron en total 7.149 pastillas de 40,2 mm de diámetro, con una masa total de 2.146,5 kg. El funcionamiento de esa unidad subcrítica aseguró un valor de k_{eff} de 0,852, más elevado del que había sido previsto en el cálculo.

2 - Se fabricaron, de acuerdo con la especificación que prevía un núcleo de 54,36% U_3O_8 - 45,64% Al, 6 elementos combustibles, cada uno dotado de 17 placas, con uranio enriquecido a 19,91% U-235, para el Reactor "Argonauta", del Instituto de Ingeniería Nuclear, Rio de Janeiro. Igualmente se fabricaron 3 elementos combustibles más, idénticos a los citados, aunque con núcleo de U_3O_8 natural. Las placas fueron obtenidas por laminación de conjuntos de moldura con aleación de aluminio 1100.

3 - Gracias a las precauciones adoptadas durante todas las etapas de fabricación de esas placas con uranio enriquecido, suministrado por la United States Atomic Energy Commission (Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos), no se perdió ningún "cermet" ni ninguna placa laminada. Las pérdidas totales, determinadas después de concluida toda la fabricación, fueron solamente de 9,4 g de U total, conteniendo 1,9 g U-235.

4 - Se han descrito los principales perfeccionamientos que han ocupado la atención de los autores en la División de Metalurgia Nuclear, y que son los siguientes: a) producción de placas delgadas, con "cermets", de 1,21 a 1,31 mm de espesor total, comprendiendo un núcleo de solamente 0,3 mm de espesor; b) placas con "cermets" de contenidos más elevados en U_3O_8 , en dispersión con aluminio, habiéndose producido partidas de placas de 55 a 75% U_3O_8 en el "cermet"; c) placas dotadas de varios "cermets", generalmente 2 o 4, prismáticos o cilíndricos, de base elíptica, con objeto de conseguir una mejor geometría, mejores condiciones de fijación de los elementos estructurales, mayor resistencia a los efectos resultantes de las tensiones térmicas y consecuencias de los gases residuales, y por fin, menor riesgo de contaminación, en el caso de rotura localizada del revestimiento; y d) placas dotadas de núcleos de aleación Al-U.

AGRADECIMIENTO

Los autores manifiestan su agradecimiento al Ing. Cibarracaceres Aguilera, del Servicio de Cálculo Analógico y Digital de este Instituto, por la excelente colaboración recibida en la preparación del texto en lengua española.

RESUMO

Descrevem os autores os trabalhos de desenvolvimento e fabricação de elementos combustíveis para reatores nucleares de pesquisa realizados na Divisão de Metalurgia Nuclear do Instituto de Energia Atômica. Os trabalhos compreenderam extensas investigações experimentais sobre as características metalúrgicas dos materiais empregados, UO_2 , U_3O_8 e ligas de alumínio, quase todos produzidos no Brasil, assim como o desenvolvimento dos processos de fabricação dos elementos combustíveis e o projeto e construção de muitos dos fornos e equipamentos necessários.

São descritas a fabricação dos elementos combustíveis para conjunto sub-crítico "Re-Suco", constituídos por pastilhas de UO_2 natural com revestimento de tubo de liga de alumínio e a produção dos elementos combustíveis para o reator "Argonauta", conjuntos de placas constituídas de núcleos contendo urânio enriquecido a 19,91% U-235 na forma de U_3O_8 em dispersão com alumínio.

Resumem-se, igualmente, os trabalhos de desenvolvimento de outros tipos de elementos combustíveis em placas, compreendendo:

- a) placas delgadas com apenas 1,2 mm de espessura e com núcleo de cermet;
- b) placas com cermets $Al-U_3O_8$, contendo até 75% U_3O_8 ;
- c) placas contendo cermets múltiplos e
- d) placas revestidas ainda por ligas de alumínio, com núcleos de ligas Al-U.

SUMMARY

The authors describe the studies of development and fabrication of fuel elements for research reactors conducted at the Divisão de Metalurgia Nuclear do Instituto de Energia Atômica. The studies comprised extensive experimental investigations concerning the metallurgical characteristics of UO_2 , U_3O_8 and aluminum alloys, most of them having been produced in Brazil, besides the development of the fabrication processes of the fuel elements and the design and the construction of many of necessary furnace and equipments.

The fuel element fabrication for the sub-critical assembly "Re-Suco", consisting of natural UO_2 pellets packed in aluminum alloy tubes, and for the "Argonaut" reactor assemblies, consisting of plates containing enriched U_3O_8 at 19,91% U-235 dispersed in aluminum as core material, are described in this paper.

- a) thin plates with 1,2 mm thick with cermet cores;
- b) plates with $Al-U_3O_8$ cermets up to 75% U_3O_8 ;
- c) plates having four cermets and
- d) aluminum-alloy clad plates with Al-U alloy cores.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) PEREIRA DA SILVA, P.S.C., SOUZA SANTOS, T.D. e FREITAS, C.T.
- "Contrôle dimensional de pastilhas de urânio para o reator "Re-Suco". ABM - Bol.Ass.Bras.Met., v.20, nº 85, p. 759-770, 1964.
- (2) SOUZA SANTOS, T.D., BIDWELL, R.M., FREITAS, C.T., HAYDT, H. M., e PEREIRA DA SILVA, P.S.C. - "Estudo experimental das principais variáveis para a produção de pastilhas de UO_2 para o reator sub-crítico "Re-Suco". ABM - Bol.Ass.Bras.Met., v. 20, nº 85, p. 771-784, 1964.

- (3) SOUZA SANTOS, T.D., HAYDT, H.M., e FREITAS, C.T. - "Experimental Studies on the Fabrication of Thin Fuel Plates with U_3O_8 -Al Cermets". Proceedings, Third International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, v. 10, p. 33-37, Organização das Nações Unidas, New York, 1965.
- (4) SOUZA SANTOS, T.D., HAYDT, H.M. e FREITAS, C.T. - "Fabricação dos elementos combustíveis de UO_2 para o conjunto sub-crítico "Re-Suco". Metalurgia Rev. Ass. Bras. Met., v. 21, nº 88, p. 217-222, 1965.
- (5) SOUZA SANTOS, T.D., HAYDT, H.M., FREITAS, C.T., CAPOCCHI, J. D.T., CINTRA, S.H.L., GENTILE, E.F. e PUCCINI, E.C. - "Principais características metalúrgicas dos elementos combustíveis fabricados para o conjunto sub-crítico "Re-Suco". - Metalurgia Rev. Ass. Bras. Met., v. 23, nº 112, p. 175.
- (6) SOUZA SANTOS, T.D., HAYDT, H.M. e FREITAS, C.T. - "Development Studies for Argonaut Fuel Plates Fabrication" - Transactions, Study Group Meeting on the Utilization of Research Reactors, São Paulo, 1963, v. 1, p. 279-297.
- (7) SOUZA SANTOS, T.D., BIDWELL, R.M., HAYDT, H.M. e FREITAS, C. T. - "Nota preliminar sobre propriedades e estruturas de dispersões U_3O_8 -Al". ABM - Bol. Ass. Bras. Met., v. 20, nº 83, p. 567-576, 1964.
- (8) SOUZA SANTOS, T.D., HAYDT, H.M. e FREITAS, C.T. - "Fabricação de elementos combustíveis para o reator Argonauta do Instituto de Engenharia Nuclear". Metalurgia - Rev. Ass. Bras. Met., v. 21, nº 90, p. 369-376, 1965.
- (9) SOUZA SANTOS, T.D., HAYDT, H.M. e FREITAS, C.T. - "Princi-

pais característicos metalúrgicos dos elementos combustíveis produzidos para o reator "Argonauta" do Instituto de Engenharia Nuclear". Metalurgia - Rev. Ass. Bras. Met., v. 21, nº 97, p. 909-921, 1965.

- (10) BERGUA, H., FRIDDLE, R., DIAZ, J. e BAIRD, J. - "Fabrication of the ISNSE Fuel Element for Low Power Research Reactors". Nuclear Fuel Elements, p. 184-192. Reinhold Publishing Co, New York, 1959.
- (11) SOUZA SANTOS, T.D., HAYDT, H.M. e FREITAS, C.T. - "Experimental Studies on the Fabrication of Thin Fuel Plates with U_3O_8 - Al Cermets". Proceedings, Third International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, v. 10, p. 33-37, Organização das Nações Unidas, New York, 1965.
- (12) SOUZA SANTOS, T.D., HAYDT, H.M., FREITAS, C.T., GENTILE, E. F. e CINTRA, S.H.L. - "Característicos de placas delgadas para elementos combustíveis contendo dispersões de U_3O_8 - Al". Metalurgia - Rev. Ass. Bras. Met., v. 22, nº 109, p. 935-940, 1966.
- (13) CAPOCCHI, J.D.T., CINTRA, S.H.L. e GENTILE, E.F. - "Estudo experimental de fabricação de elementos combustíveis planos contendo núcleos de "cermets". Metalurgia - Rev. Ass. Bras. Met., v. 24, nº 124, p. 201-211, 1968.
- (14) CAPOCCHI, J.D.T., CINTRA, S.H.L. e GENTILE, E.F. - "Estudo de fabricação de elementos combustíveis planos com núcleos de "cermets" de 65% U_3O_8 - 35% Al, revestidos com liga de alumínio". Metalurgia - Rev. Ass. Bras. Met., v. 24, nº 133, p. 913-919, 1968.

- (15) SOUZA SANTOS, T.D., CAPOCCHI, J.D.T. e CINTRA, S.H.L. - "Estudo experimental de fabricação de elementos combustíveis planos dotados de múltiplos "cermets". - Metalurgia - Rev. Ass. Bras. Met., v. 24, nº 125, p. 295-300, 1968.
- (16) HAYDT, H.M. e CINTRA, S.H.L. - "Nota preliminar sobre a fabricação de elementos combustíveis planos contendo núcleo de liga Al-U". Metalurgia - Rev. Ass. Bras. Met., v. 23, nº 120, p. 955-960, 1967.
- (17) CINTRA, S.H.L., GENTILE, E.F., HAYDT, H.M. e CAPOCCHI, J.D.T. - "Desenvolvimento de placas combustíveis contendo núcleo de liga Al-20% U e Al-20% U 0,8% Si". Metalurgia - Rev. Ass. Brasil. Met., v. 24, nº 131, p. 781-787, 1968.