



**PRINCIPAIS CARACTERÍSTICOS METALÚRGICOS DOS  
ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS PRODUZIDOS PARA O  
REATOR "ARGONAUTA" DO INSTITUTO DE ENGE-  
NHARIA NUCLEAR**

*THARCISIO DE SOUZA SANTOS, HELITON MOTTA HAYDT e  
CLAUER TRENCH DE FREITAS*

**PUBLICAÇÃO IEA N.º 112**

Dezembro — 1965



**INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA**  
Caixa Postal 11049 (Pinheiros)  
CIDADE UNIVERSITÁRIA "ARMANDO DE SALLES OLIVEIRA"  
SÃO PAULO -- BRASIL

MAIN METALLURGICAL CHARACTERISTICS OF THE FUEL ELEMENTS FOR THE  
"ARGONAUTA" REACTOR OF THE "INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR"

Tharcísio D. de Souza Santos, Heliton Motta Haydt  
and Clauer Trench de Freitas

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

Publicação IEA nº 112

Dezembro - 1965

Comissão Nacional de Energia Nuclear

Presidente: Prof. Luiz Cintra do Prado

Universidade de São Paulo

Reitor: Prof. Luiz Antonio da Gama e Silva

Instituto de Energia Atômica

Diretor: Prof. Rômulo Ribeiro Pieroni

Conselho Técnico-Científico do IEA

Prof. Hélio Lourenço de Oliveira	)	) pela USP
Prof. Walter Borzani	)	
Prof. Rui Ribeiro Franco	)	) pela CNEN
Prof. Theodoreto H.I. de Arruda Souto	)	

Divisões Didático-Científicas:

Div. de Física Nuclear: Prof. Marcello D.S. Santos

Div. de Engenharia Nuclear: Pedro Bento de Camargo

Div. de Ensino e Formação: Prof. Luiz Cintra do Prado  
(Licenciado)

Div. de Radioquímica: Prof. Fausto Walter de Lima

Div. de Radiobiologia: Prof. Rômulo Ribeiro Pieroni

Div. de Metalurgia Nuclear: Prof. Tharcísio D.S. Santos

Div. de Engenharia Química: Prof. Kazimierz J. Brill

Div. de Física de Reatores:

THARCÍSIO D. DE SOUZA SANTOS, HELITON MOTTA HAYDT  
AND CLAUER TRENCH DE FREITAS

The authors describe the fabrication of the fuel elements for the "Argonauta" reactor, of the Instituto de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro, Guanabara. The reactor was almost entirely built in Rio de Janeiro and went in operation for the first time on February 20th, 1965. Eight complete fuel elements were produced, six of them with enriched uranium (19.91 % U-235) and two with natural uranium. Each fuel element has seventeen plates, measuring 610 mm in length, 73 mm in width and 2,43 mm thickness, fully clad with 1100 aluminum alloy. Each plate has 21,0 g of U-235 and a maximum weight of 225 g of total aluminum (cladding and aluminum powder in the core dispersion). The plates were produced by roll bonding of picture frame assemblies of 1100 aluminum alloy containing a cermet of 54,36 %  $U_3O_8$  and 45,64 % of aluminum powder. Thanks to the adopted precautions, not a single cermet or plate were lost during the fabrication process. The produced elements have a total weight of 10,745,3 g of total uranium and 2,139.4 g of U-235. The careful accounting of the fabrication losses has shown that only 9.4 g of total uranium, containing 1.9 g of U-235, were lost during the whole operations.

### RÉSUMÉ

Les auteurs présentent la fabrication des éléments combustibles pour le réacteur Argonauta de l'Instituto de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro, Guanabara. Le réacteur a été presque entièrement construit à Rio de Janeiro et la première divergence eu lieu le 20 février 1965.

Huit éléments combustibles ont été produits, six d'entre eux à uranium enrichi (19,91 % en U-235).

Chaque élément combustible est constitué de 17 plaques de 2,43 mm de épaisseur, 610 mm de longueur et 73 mm de largeur entièrement revêtues d'aluminium 1100. Chaque plaque renferme 21,0 g de U-235 et au maximum 225 d'aluminium (gaina

ge et mixture du noyau). Les plaques ont été obtenues par colaminage à partir d'ensembles comportant une enveloppe d'aluminium 1100 renfermant un "cermet" de  $U_3O_8$  (54,36 %) et d'aluminium en poudre (45,64 %). Grâce aux précautions adoptées aucune plaque e aucun "cermet" ont été perdus. L'ensemble des éléments fabriqués contiennent 10.745,3 g de uranium total et 2.139,4 g de U-235. La perte totale a été de 9,4 g d'uranium et 1,9 de U-235.

### RESUMEN

Describen los autores, los trabajos de fabricación de los elementos combustibles para el reactor "Argonauta" del Instituto de Ingeniería Nuclear, Rio de Janeiro, Guanabara. El reactor fue casi totalmente construido en Rio de Janeiro y entró en funcionamiento por primera vez el 20 de Febrero del corriente año.

Fueron producidos ocho elementos combustibles, seis de los cuales con uranio enriquecido (a 19,91 % de U-235, dado por la concentración natural en aquel isótopo).

Cada elemento combustible contiene 17 placas de 2,43 mm de espesor, de 610 mm de longitud y de 73 mm de ancho, totalmente revestidos por aleación de aluminio 1100. Cada placa encierra 21,0 g de U-235 y debe contener al máximo 225 g de aluminio total (revestimiento y material del núcleo). Las placas fueron obtenidas por co-laminación, a partir de conjuntos montados en moldura de aleación de aluminio 1100 encerrando cerametal ("cermet") de 54,36 %  $U_3O_8$  y 45,64 % aluminio en polvo. Gracias a las precauciones adoptadas no se perdió ningun cerametal y ninguna chapa. Los elementos producidos encierran en todo, 10.745,3 g de uranio total y 2.139,4 g de U-235. Las pérdidas verificadas se resumieron a 9,4 g de uranio total y a 1,9 g de U-235.

# PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS METALÚRGICAS DOS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS PRODUZIDOS PARA O REATOR "ARGONAUTA" DO INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR <sup>(1)</sup>

THARCISIO D. DE SOUZA SANTOS <sup>(2)</sup>

HELITON M. HAYDT <sup>(3)</sup>

CLAUER TRENCH DE FREITAS <sup>(4)</sup>

## RESUMO

*Descrevem os autores os trabalhos de fabricação dos elementos combustíveis para o reator "Argonauta", do Instituto de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro, Guanabara. O reator foi quase todo construído no Rio de Janeiro e entrou em funcionamento pela primeira vez em 20 de fevereiro do corrente ano.*

*Foram produzidos oito elementos combustíveis, seis dos quais com urânio enriquecido (a 19,91% de U-235, fornecido pela concentração natural naquele isótopo). Cada elemento combustível contém 17 placas de 2,43 mm de espessura, de 610 mm de comprimento e de 73 mm de largura, totalmente revestidas por liga de alumínio 1100. Cada placa encerra 21,0 g de U-235 e deve conter no máximo 225 g de alumínio total (revestimento e material do núcleo). As placas foram obtidas por co-laminação, a partir de conjuntos montados em moldura em liga de alumínio 1100 encerrando "cermet" de 54,36% U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> e 45,64% Al em pó.*

*Graças às precauções adotadas não se perdeu nenhum "cermet" e nenhuma chapa. Os elementos produzidos encerram ao todo 10.745,3 g de urânio total e 2.139,4 g de U-235. As perdas apuradas se resumiram a 9,4 g de urânio total e a 1,9 g de U-235.*

## 1. INTRODUÇÃO

Coube à Divisão de Metalurgia Nuclear do Instituto de Energia Atômica a incumbência de fabricar os elementos combustíveis para o reator "Argonauta" do Instituto de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro, Guanabara. O reator foi desenvolvido no "Argonne National Laboratory", Argonne, Ill., Estados Unidos da América do Norte, e foi projetado principalmente para pesquisas e treinamento; sua potência máxima é de 100 kW e utiliza água como moderador e grafita como refletor. O "Argonauta" (de Argonne's Nuclear Assembly for University Training), ou CP-11, é essencialmente um cubo de grafita dotado de núcleo central anular onde são inseridos os elementos combustíveis, cada qual dotado de 17 chapas paralelas encerrando um núcleo central, de dispersão de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>, com 20% de enriquecimento no isótopo U-235, com alumínio, com revestimento por liga de alumínio 1100.

Incumbiu-se de sua construção, no Rio de Janeiro, a firma Mecânica CBV Ltda., que fabricou todas as partes constituintes, inclusive a parte de controle eletrônico, com a exclusão dos elementos combustíveis. Com a conclusão do edifício na Cidade Universitária do Rio de Janeiro, na ilha do Fundão, pôde ser rapidamente instalado o reator que já se achava pronto. Os elementos combustíveis fabricados pela Divisão de Metalurgia Nuclear do I.E.A. foram expedidos em 27 de outubro de 1964 e, após as experiências preliminares, entrou o "Argonauta" em criticidade, pela primeira vez, às 5,55 horas de 20 de fevereiro. Sua inauguração deu-se em festividade presidida pelo Presidente da República em 7 de maio.

Em trabalhos anteriormente publicados <sup>1,2,3,4,5</sup>, descreveram os autores as diversas fases dos estudos preliminares que levaram ao desenvolvimento do processo de fabricação. Nesses trabalhos utilizou-se U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> especialmente preparado, a partir de diuranato de amônio de pureza nuclear, produzido no Instituto de Energia Atômica, empregando para isso o uranato de sódio, oriundo das operações de tratamento de concentrados de monazita de Guarapari, ES, feitas pela Orquima S.A., para a Comissão Nacional de Energia Nuclear.

Os prolongados estudos experimentais realizados permitiram obter todos os dados para o desenvolvimento do processo e para o projeto e construção do aparelhamento metalúrgico necessário. O processo adotado foi o de co-laminação, que consiste essencialmente em se promover,

(1) Contribuição Técnica nº 600. Apresentada ao XX Congresso da ABM; Rio de Janeiro, julho de 1965.

(2) Membro da ABM; Chefe da Divisão de Metalurgia Nuclear, Instituto de Energia Atômica; Professor Catedrático de Metalurgia dos Metais Não-Ferrosos, e Diretor da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

(3) Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista e Engenheiro Nuclear; Divisão de Metalurgia Nuclear, Instituto de Energia Atômica, São Paulo, SP.

(4) Membro da ABM; Engenheiro Civil e Engenheiro Nuclear; Divisão de Metalurgia Nuclear, Instituto de Energia Atômica, São Paulo, SP.

por laminação a quente, o caldeamento de um conjunto constituído pelas duas chapas de alumínio que vão constituir o revestimento das faces, com a chapa central, também de alumínio, dentro da qual se inseriu, como numa moldura, o "cermet" constituído por uma dispersão de  $U_3O_8$  com pó de alumínio. O elevado teor de  $U_3O_8$  no "cermet" (que atingiu 54,36% nas placas produzidas) introduz grandes dificuldades para o adequado comportamento plástico do núcleo nas operações de laminação, tanto a quente como a frio, na fase final. Além disso, é de grande importância que se consiga perfeito e contínuo caldeamento entre o "cermet" e a chapa de alumínio de revestimento.

Outros reatores "Argonauta", a começar pelo primeiro desenvolvido no "Argonne National Laboratory", empregam elementos combustíveis constituídos de chapas obtidas por co-extrusão. Por êsse processo, obtém-se uma longa tira de liga de alumínio contendo no núcleo o "cermet" deformado; as chapas são obtidas por cortes transversais, o que causa ficar o "cermet" do núcleo exposto em ambas as extremidades da chapa. Essa exposição é muito inconveniente, de vez que é necessário proteger por pintura adequada as extremidades, para evitar as interações com o moderador e contaminação de todo o conjunto pelos produtos de fissão que de outra forma escapariam. As chapas obtidas pelo processo de co-laminação são totalmente revestidas, inclusive nas suas extremidades; asseguram assim condições muito melhores para o funcionamento do reator.

Para melhorar os característicos do "Argonauta" e diminuir a massa total de U-235 necessária, desejaram os técnicos do I.E.N. que se aumentasse a massa de U-235 contido em cada chapa, diminuindo-se correspondentemente a massa total de alumínio. Assim, em lugar de  $19,3 \pm 0,2$  g de U-235, constante das especificações das últimas modificações introduzidas pelo "Argonne National Laboratory", desejou-se elevar o conteúdo a  $21,0 \pm 0,2$  g, o que determinou o máximo de 225 g de Al contido por chapa. Convém lembrar que o núcleo das chapas que constituíram o primeiro reator "Argonauta" continha só 39% de  $U_3O_8$ <sup>6</sup>. A nova especificação do I.E.N. exigia teor de 54,36%  $U_3O_8$ .

Graças aos estudos desenvolvidos e às precauções tomadas, foi possível satisfazer aos novos limites indicados, não tendo sido perdido durante toda a fase de fabricação nenhum "cermet", nenhuma única placa, com urânio enriquecido. Grandes cuidados foram também tomados no controle de todos os dados de fabricação. Em consequência, as perdas totais de material verificadas — desde a fase de retirada do  $U_3O_8$  enriquecido dos recipientes em que foi importado da "United States Atomic Energy Commission", até a de entrega dos elementos combustíveis ao I.E.N.,

encerrando 10.745,3 g de urânio total e 2.139,4 g de U-235 — se resumiram a apenas 9,4 g de urânio total e a 1,9 g de U-235 contido.

Nesta contribuição os autores descrevem em maior detalhe: a) os principais característicos metalúrgicos dos elementos combustíveis produzidos, inclusive os de urânio de concentração natural em isótopo U-235; b) os dados referentes ao controle estatístico dos compactados e "cermets" produzidos; c) as correlações estabelecidas entre as dimensões do "cermet" na moldura e as dimensões finais do núcleo contido na chapa revestida, após concluídas tôdas as operações de laminação; d) e os ensaios não-destrutivos executados nas chapas acabadas antes de sua montagem final.

## 2. ESPECIFICAÇÕES DOS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS

Em virtude do maior conteúdo desejado em U-235 em cada chapa, foram especificados apenas 6 elementos combustíveis com urânio enriquecido a cerca de 20% de U-235, dotado cada um de 17 chapas, além de 2 elementos combustíveis em tudo análogos aos anteriores, contendo entretanto urânio de concentração natural no isótopo U-235.

As principais especificações referentes aos elementos combustíveis de urânio enriquecido são reproduzidas a seguir:

Número de elementos combustíveis ....	6
Número de chapas em cada elemento combustível .....	17
Espessura das chapas (mm) .....	$2,43 \pm 0,02$
Espessura nominal do revestimento em cada face (mm) .....	0,28
Espessura nominal do núcleo do "cermet" após acabamento da chapa (mm) ...	1,87
Largura do núcleo do "cermet" após acabamento da chapa (mm) .....	$65,75 \pm 0,15$
Comprimento total das chapas depois de acabadas (mm) .....	$610,00 \pm 0,50$
Comprimento total do núcleo do "cermet" depois do acabamento da chapa (mm)	$602,00 \pm 5,0$
Composição do "cermet" (% $U_3O_8$ ) .....	54,36
Composição do "cermet" (% Al) .....	45,64
Tamanho das partículas de $U_3O_8$ (microns)	— 44
Tamanho das partículas do pó de alumínio (microns) .....	—147
Porcentagem de U-235 no $U_3O_8$ .....	19,91
Massa de U-235 por chapa (g) .....	$21,0 \pm 0,2$
Massa máxima de Al por chapa (g) ....	225
Distribuição média de U-235 por unidade de área na chapa pronta (g/cm <sup>2</sup> ) ...	0,051

Os estudos preliminares desenvolvidos<sup>1,2</sup> foram baseados na previsão original de que o conteúdo de U-235 em cada chapa deveria se situar entre  $19,3 \pm 0,2$  g. Quando, em março de 1964, foram feitas as alterações nas especificações, aumentando o conteúdo de U-235 e diminuindo a massa total de alumínio, tanto do núcleo como dos revestimentos das faces, foi necessário que se determinasse novamente a influência dos principais fatores em jogo, principalmente das condições de compactação e de pré-sinterização dos compactados, para a obtenção de “cermets” que apresentassem a necessária plasticidade nas operações de conformação mecânica a quente.

### 3. DESCRIÇÃO DAS PRINCIPAIS OPERAÇÕES

**PREPARO DAS CARGAS DE  $U_3O_8$ -Al** — Da “United States Atomic Energy Commission” foi recebida a partida de  $U_3O_8$  com 19,91% de U-235, devidamente acondicionada, tendo em vista as condições de segurança necessárias. O  $U_3O_8$  enriquecido, em pó de diâmetro máximo de 100 malhas por polegada Tyler, mostrou possuir característicos de compactabilidade bastante inferiores ao pó de  $U_3O_8$  natural produzido pela Divisão de Metalurgia do IEA, não só para os estudos já descritos<sup>1,2,3</sup>, como para a fabricação dos dois elementos combustíveis de urânio natural e que também fazem parte da carga do “Argonauta”.

A determinação dos característicos próprios foi feita com extremo cuidado, a fim de reduzir ao mínimo as eventuais perdas. Depois de traçadas as curvas características das principais propriedades de compactação e de sinterização, em função das variáveis de processo, foram os compactados e “cermets” desintegrados para sua utilização na fabricação das chapas para os 6 elementos combustíveis do programa.



Fig. 1 — Vista parcial dos fornos sob hidrogênio utilizados com atmosfera normal em operações de calcinação final de diuranato de amônio para a produção de  $U_3O_8$  natural.

A fig. 1 mostra, em vista parcial, os fornos que foram utilizados, em operações de calcinação do diuranato de amônio a  $U_3O_8$  natural para as primeiras experiências realizadas. Para todos os trabalhos ulteriores, entretanto, foi utilizada a calcinação do diuranato de amônio a  $U_3O_8$ , em fornos de mufla, empregando bandejas de ferro fundido com 26% Cr.

A fim de reduzir ao mínimo as perdas de manipulação do  $U_3O_8$  enriquecido, a pesagem de todas as cargas foi sempre realizada em “glove box”, em balança Mettler de 1 mg de leitura. As cargas constituídas de 54,56%  $U_3O_8$  enriquecido a 45,64% de pó de alumínio — 100 malhas por polegada eram cuidadosamente pesadas e, em seguida, colocadas em recipientes cilíndricos de cloreto de polivinila, com bolas de borracha dura (fig. 2). Cada carga permitia a obtenção ulteriores de quatro compactados. Os melhores resultados dos estudos indicaram a necessidade de o condicionamento ser feito durante 48 horas, tempo que foi por isso mantido rigorosamente no decurso de todo o trabalho de fabricação das 102 chapas.



Fig. 2 — Condicionamento das cargas de  $U_3O_8$  enriquecido e alumínio em recipientes cilíndricos de 3 dm<sup>3</sup> de volume útil de material plástico, com esferas de borracha dura.

#### COMPACTAÇÃO DAS CARGAS CONDICIONADAS —

*Resultados obtidos na fase experimental:* A compactação das cargas para constituir os “cermets” prismáticos de base retangular, foi feita em matriz especialmente construída, em aço de 12% Cr e 2% C, em prensa hidráulica de 100 t de esforço máximo. Conforme foi descrito em um dos trabalhos anteriores<sup>1</sup>, foram estudados experimentalmente os principais fatores que determinaram as propriedades dos compactados e dos “cermets” após a pré-sinterização. Desses estudos experi-

mentais, que inclusive visaram a determinação do coeficiente de alargamento do "cermet" no decurso do processo de laminação, é que resultaram os dados a partir dos quais se pôde projetar a matriz para garantir a fabricação das chapas com os característicos indicados no capítulo 2.

A variação dimensional do comprimento e da largura dos corpos compactados foi pequena em relação à da altura, que é determinada pela pressão de compactação. Com efeito, as duas primeiras dimensões dependem principalmente das dimensões da matriz, variando pouco com a pressão de compactação adotada. A largura e o comprimento do compactado são contudo maiores do que as dimensões correspondentes da matriz, em virtude dos acréscimos decorrentes do alívio das tensões no estado tripla existente durante a aplicação da carga de compactação. Foi verificado experimentalmente que o acréscimo é função da pressão aplicada, sendo muito pequena a influência das variáveis de condicionamento do pó, bem como do teor de alumínio na mistura (para a faixa de 45 a 55%).

Na fase experimental do trabalho em que se utilizou  $U_3O_8$  natural<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup>, os valores encontrados para cargas de compactação entre 40 e 60 t para as principais dimensões no estado compactado, foram: comprimento  $c_v = 100,18 \pm 0,10$  mm; largura  $l_v = 65,30 \pm 0,10$  mm e altura  $h_v = 11,15 \pm 0,09$  mm. O valor resultante da densidade aparente no estado compactado foi de  $\rho_v = 3,15 \pm 0,03$  g/cm<sup>3</sup>.

**Pressão de compactação** — Como se disse, devido às diferenças de compactabilidade das cargas preparadas com  $U_3O_8$  enriquecido em relação às de  $U_3O_8$  natural, quando se passou a utilizar o  $U_3O_8$  enriquecido, foi necessário que se determinasse previamente a pressão de compactação para reproduzir a densidade acima indicada. A pressão utilizada na produção dos compactados de 54,36%  $U_3O_8$  enriquecido e 45,64% Al foi de 0,923 t/cm<sup>2</sup>, enquanto que, para a produção de compactados de igual densidade e de igual composição, mas contendo  $U_3O_8$  natural, foi necessária apenas a pressão de 0,692 t/cm<sup>2</sup>. A fig. 3 mostra o aspecto da operação de compactação das cargas, na prensa hidráulica de 100 t de esforço máximo.

**Contrôle das perdas** — Foram tomadas precauções especiais a fim de serem reduzidas ao mínimo as perdas de manipulação dos materiais, principalmente por se tratar de material de alto valor unitário e que tem de ser meticulosamente contabilizado, pois que é cedido, através de contrato especial, pela "Atomic Energy Commission", órgão do Governo dos Estados Unidos. Os mesmos cuidados foram tomados em todos os trabalhos ulteriores, visando-se reduzir ao mínimo os riscos de virem a ser perdidas chapas durante a fabricação.



Fig. 3 — Compactação da carga condicionada sob prensa hidráulica de 100 t de capacidade para produção de compactado de 65×100 mm e 11,4 mm de espessura.

O  $U_3O_8$  recebido tem o teor de 19,91% U-235. Foi obtido a partir de  $UF_6$ , cotado pela AEC ao preço de US\$ 2547 por kg de U contido<sup>2</sup>. Acrescentando-se os custos de conversão, tem-se US\$ 2210 por kg de  $U_3O_8$  ou seja Cr\$ 4.020 por g ao câmbio atual (Cr\$ 1.820 por dólar). As pesagens foram efetuadas sempre em balança Mettler de 0,001 g de precisão, encerrada em "glove box" com aspiração do ar e dotada dos necessários filtros. Além disso, a limpeza da matriz foi feita sempre sobre um recipiente adequado, de forma a se poder recuperar todos os resíduos da carga aderentes às paredes da mesma, depois de retirado o compactado. Cada compactado era retirado da matriz com massa em geral 5 mg menor do que a massa da carga pesada. A maior parte dessa diferença, correspondente ao material aderido às paredes da matriz, pôde ser recuperado, retornando às cargas. A perda total comprovada no decurso da fabricação dos 102 compactados (que permitiram a produção das 102 chapas fabricadas) foi de apenas 13 mg de carga.

**PRÉ-SINTERIZAÇÃO** — *Resultados obtidos na fase experimental:* Os "cermets" obtidos após a pré-sinterização em atmosfera de argônio, nas condições já descritas em outro trabalho<sup>5</sup>, quando produzidos com  $U_3O_8$  natural, tinham as seguintes dimensões: comprimento  $c_s = 100,55 \pm 0,15$  mm, largura  $l_s = 65,50 \pm 0,10$  mm e altura  $h_s = 11,25 \pm 0,10$  mm.

Constatou-se que os compactados produzidos com o  $U_3O_8$  enriquecido apresentavam diferenças em suas dimensões após a pré-sinterização realizada sob argônio, mantidas tôdas as condições de trabalho. Na primeira fase dos trabalhos de fabricação, em que foram produzidos 38 compactados, houve necessidade de se variar a porcentagem de  $U_3O_8$ , bem como a massa do compactado para se atender ao requisito da economia de neutrons no reator. As dimensões dos 64 compactados produzidos a seguir foram as seguintes: comprimento  $e_s = 100,90 \pm 0,15$  mm, largura  $l_s = 65,75 \pm 0,15$  mm e altura  $h_s = 11,30 \pm 0,09$  mm. Excluindo-se os quatro primeiros compactados produzidos, para os 98 restantes a altura obtida foi de  $h_s = 11,28 \pm 0,07$  mm.

*Desprendimento de umidade durante a pré-sinterização* — Fôra constatado logo no início dos trabalhos com urânio enriquecido que existia umidade e que as cargas preparadas apresentavam nítida tendência de aumento de massa, por absorção de umidade atmosférica. Dos dados de pesagem resultou que a perda média de massa por eliminação da umidade da carga na operação de pré-sinterização era apenas de 0,363 g por "cermet" (média obtida para os 98 "cermets" produzidos depois dos quatro iniciais, de menor teor em  $U_3O_8$ ) correspondente a apenas 0,158% do peso inicial.

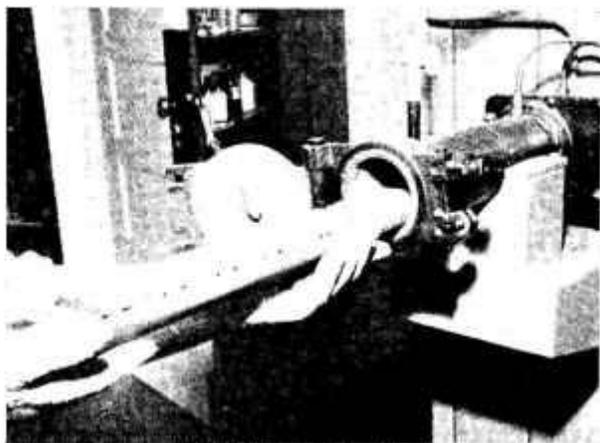


Fig. 4 — Carregamento de um bote com "cermets" no forno contínuo sob atmosfera de argônio para a operação de pré-sinterização.

*Contrôle das perdas* — A fig. 4 mostra a operação de carregamento no forno contínuo de sinterização, sob atmosfera de argônio, de um bote contendo compactado de urânio natural e pó de alumínio. Nos casos de produção de "cermets" de urânio enriquecido, tomou-se a precaução adicional de se envolver os compactados em folha delgada de alumínio, evitando assim que o eventual atrito contra as paredes do forno pu-

desse resultar perdas de material. O forno é dotado de duas zonas de contrôle independente de temperatura; foi totalmente construído pela firma Combustol Ltda. a partir do anteprojeto e das especificações fornecidas pela Divisão de Metalurgia Nuclear.

Dada a circunstância de que os "cermets" pré-sinterizados absorvem a umidade atmosférica muito rapidamente, não foi possível que se efetuasse contrôle rigoroso nas variações de massa na operação. A absorção é mais rápida logo após a retirada do bote do forno de sinterização, aumentando depois lentamente com o tempo. A saturação só se verificou depois de decorridos vários dias, o tempo dependendo da umidade relativa do ar.

Por conseguinte, o contrôle da pesagem não pôde ter precisão maior que 0,1 g para cada "cermet" produzido. Pode-se afirmar que as perdas na manipulação total foram inferiores a 10 g para os 102 "cermets" produzidos com urânio enriquecido.

*CONTRÔLE DIMENSIONAL E DE DENSIDADES* — Todos os compactados foram pesados e medidos antes da pré-sinterização. Depois de concluída a sinterização, foram os "cermets" igualmente cuidadosamente medidos e pesados em balança Mettler. A precisão nas medidas foi de 0,05 mm.

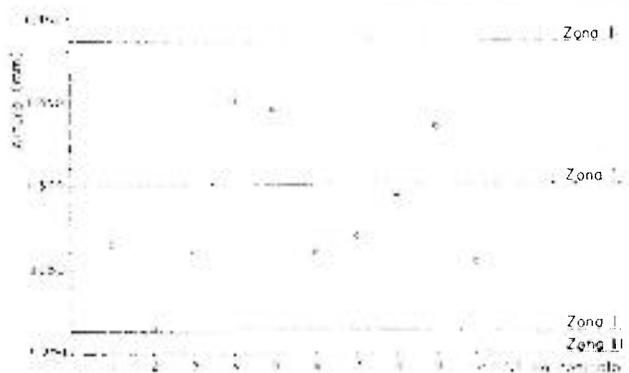


Fig. 5 — Contrôle de média da altura dos "cermets" pré-sinterizados.

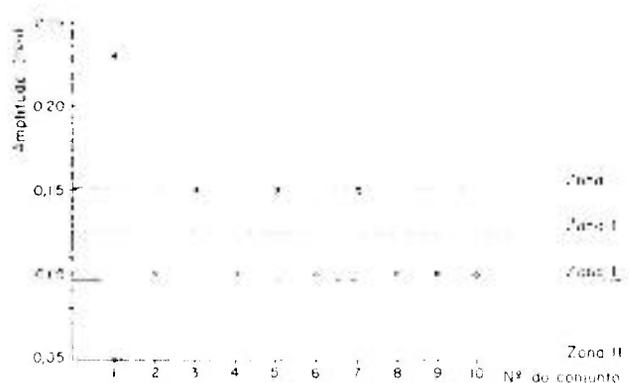


Fig. 6 — Contrôle estatístico da amplitude para  $h_s$ , altura dos "cermets" depois de pré-sinterizados.

Com os dados obtidos foram construídos os gráficos de controle de média e de amplitude para  $h_s$  e para  $h_c$ , bem como para  $c_s$ ; as figs. 5 e 6 reproduzem os dados obtidos para  $h_s$ , dimensão que sofreu maior variação.

Mostram esses gráficos que, para os nove grupos finais de 10 compactados cada, o processo esteve dentro de rigoroso controle estatístico. Conforme foi dito anteriormente, na primeira fase dos trabalhos, que abrangeu o primeiro grupo, houve necessidade de serem alterados os característicos dos compactados. Por essa razão, o ponto representativo desse conjunto está fora do gráfico de controle de amplitudes.

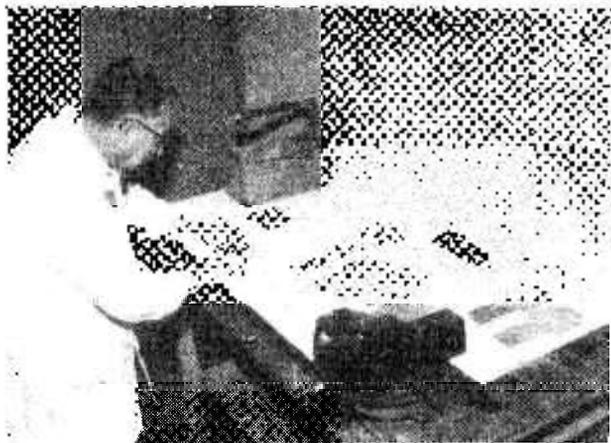


Fig. 7 — Operações para a montagem dos "cermets" nas molduras e capas.

REVESTIMENTO DOS "CERMETS" EM PAPEL DE ALUMÍNIO E PESAGEM DOS CONJUNTOS — A fim de ser evitada qualquer perda de urânio enriquecido ao ser inserido o "cermet" na moldura (fig. 7), foi o mesmo previamente protegido em papel de alumínio 1100 de 0,012 mm de espessura média. O papel de alumínio foi previamente cortado com a forma desejada e depois dobrado sobre o "cermet". O peso do papel de alumínio para proteção era de 0,98 g. Após encerrado, o conjunto era pesado a 0,001 g de precisão.

SOLDA DO CONJUNTO MONTADO — O conjunto, constituído por uma chapa de moldura com o "cermet" protegido inserido e das capas destinadas a constituir o revestimento das faces, era a seguir soldado sob arco elétrico em atmosfera de argônio com eletrodo de tungstênio (fig. 8). Depositavam-se assim oito filêtes de solda nos espaços entre as capas e a chapa da moldura, nos quatro lados do conjunto. A operação é de grande importância e visa reduzir drasticamente a oxidação das superfícies decapadas durante o aquecimento do conjunto no forno para a operação de caldeamento por laminação.



Fig. 8 — Solda do conjunto encerrando o "cermet" de  $U_{235}$  com 20% de  $U_{235}$ , pelo processo "argon arc".

RELAÇÃO ENTRE A ALTURA DO "CERMET" SINTERIZADO E O COMPRIMENTO TOTAL DO NÚCLEO NA CHAPA ACABADA — Convém chamar a atenção para a necessidade de serem rigorosamente observados os limites indicados no capítulo 2 quanto às dimensões e massa do núcleo na chapa pronta a constituir o elemento combustível. Além disso, o comprimento do núcleo, ou "cermet" deformado na operação de laminação do conjunto até a espessura final desejada, deve também ser tal que evite a possibilidade de vir a ser exposto nas extremidades, como acontece no processo de fabricação baseado na co-extrusão do conjunto. É assim de grande importância poder conhecer de antemão qual o comprimento final do núcleo e, conseqüentemente, determinar a espessura que permita obtê-lo, dentro dos limites estabelecidos pelas tolerâncias.

Na primeira fase dos trabalhos foram coligidos os principais dados que correlacionam o comprimento do núcleo do "cermet" deformado final, com a altura do "cermet" pré-sinterizado. A tabela I reúne os dados referentes às quatro primeiras chapas produzidas com urânio enriquecido.

Nota-se que  $E$ ,  $h_c$  e  $\rho_s$  variam muito pouco para poderem ser as únicas causas da variação de  $c_1$ . Procurou-se por isso estabelecer uma fórmula semi-empírica que pudesse relacionar  $c_1$  com  $h_s$  e  $h_c$ .

A expressão

$$c_1 = 89,1 h_s + 1088 + 1581/h_c$$

para  $c_1$ ,  $h_s$  e  $h_c$  em milímetros, satisfaz os resultados experimentais reproduzidos na tabela I, com erro inferior a 1,2%. Supondo  $h_c = 2,43$  mm, valor médio desejado, resulta:

$$c_1 = 89,1 h_s + 437$$

e diferenciando-se

$$dc_1 = 89,1 dh_s$$

para  $dc_1 = 5$ , resulta  $dh_s \approx 0,06$ .

Como a especificação para  $c_1$  admitia desvio de 5 mm, segue-se que o desvio admissível para  $h_s$  deveria ser da ordem de 0,06 mm.

TABELA I — Dimensões de "cermets" na moldura e nas chapas laminadas

Nº do "cermet"	E Espessura da chapa do núcleo (mm)	e Espessura da chapa de revestimento (mm)	$h_s$ Altura do "cermet" pré-sinterizado (mm)	$\rho_s$ Densidade do "cermet" (g/cm <sup>3</sup> )	$l_1$ Comprimento do núcleo laminado (mm)	$h_1$ Altura final da chapa acabada (mm)
201	12,0	2,0	11,38	3,02	570	2,45
202	12,2	2,0	11,46	3,04	585	2,45
203	12,3	2,0	11,85	3,05	605	2,48
204	12,2	2,0	12,00	3,01	617	2,46

A fim de poder generalizar mais os resultados, procurou-se determinar com o auxílio do computador IBM-1620-II do I.E.A., uma fórmula semi-empírica que levasse em conta também a influência da espessura da chapa de moldura (E). Chegou-se à seguinte expressão:

$$c_1 = 97,2 (E + 2e)/h_t - 89,1 \Delta$$

onde  $\Delta = E - h_s$ .

É válida para tôdas as dimensões em milímetros e para os seguintes intervalos de variação:

$$11,5 \leq E \leq 12,2$$

$$2,40 \leq h_t \leq 2,50$$

$$11,10 \leq h_s \leq 12,00, \text{ com } E - h_s > 0,10$$

$$e = 2$$

A expressão obtida permite demonstrar que, também para  $E = 11,5$  mm, o desvio admissível de  $h_s$  deveria ser da ordem de 0,06 mm. Note-se que 98 placas foram feitas com o valor anterior de E.

Assim, mantendo-se rigidamente nos limites da especificação as espessuras finais das chapas ( $2,43 \pm 0,02$  mm), somente à custa de cuidados especiais é que foi possível garantir as dimensões desejadas para os núcleos deformados. Como foi visto no item relativo à pré-sinterização, obteve-se no processo desenvolvido,  $h_s = 11,28 \pm 0,07$  mm (ou, mais precisamente,  $11,282 \pm 0,066$  mm).

**LAMINAÇÃO DOS CONJUNTOS** — O processo se baseia essencialmente no caldeamento por difusão durante a operação de deformação plástica a quente, no caso por laminação, do material destinado a constituir o revestimento das faces ("cladding") e o material que confina o núcleo do "cermet", a ser também deformado mecânicamente até as dimensões desejadas, por laminação a frio na fase final.

As operações de aquecimento foram realizadas em fornos elétricos de mufla, com dispositivos especialmente construídos para o posicionamento das chapas e dos conjuntos, à temperatura de 580°C. O aquecimento inicial dos conjuntos durou sempre 45 minutos e os recozimentos 10 minutos. O recozimento final para ensaio de empolamento foi feito durante 45 minutos.

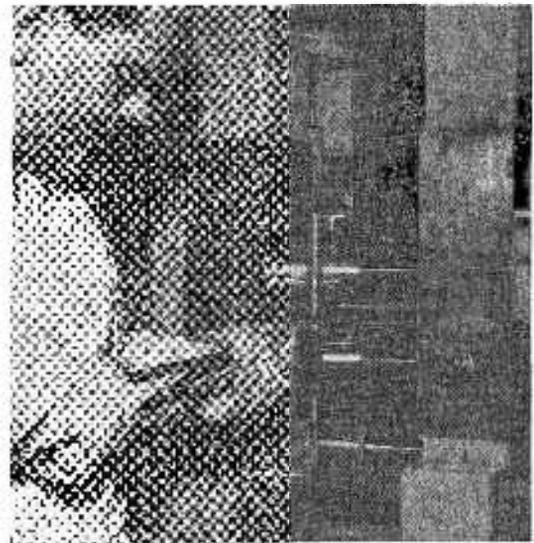


Fig. 9 — Laminação de um conjunto no laminador de precisão "Stannat-Mann".



Fig. 10 — Outra vista do laminador "Stannat-Mann" dotado de cilindros resfriados à água para a laminação a quente.

As figs. 9 e 10 mostram o laminador de precisão Stannat-Mann, acionado por motor de 20 kW, de velocidade variável, e dotado de mancais de cilindros resfriados por circulação de água nas operações de laminação a quente. O laminador pode funcionar como duo reversível ou como quádruplo, quando utiliza cilindros de 30 mm de diâmetro, apoiando-se nos cilindros normais.

Os conjuntos foram laminados a quente até a espessura de 3,40 mm e em seguida recozidos de 9 a 11 minutos. A seqüência adotada compreendia laminação a quente com redução de 59%, seguida de recozimento, nova laminação a quente com 61% de redução e recozimento, após o que o material resfriado era cortado; laminação a frio com 30% de redução seguida de recozimento e laminação a frio final até a espessura desejada, findo o que era realizado o ensaio de empolamento.

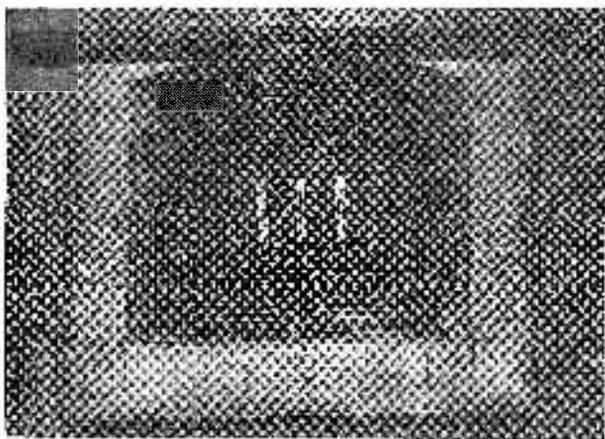


Fig. 11 — Dispositivos adotados para o recozimento das chapas durante a laminação, no forno de mufla construído especialmente para a construção das chapas "Argonauta".

A fig. 11 mostra o forno de recozimento construído especialmente para a fabricação das chapas "Argonauta", vendo-se o dispositivo utilizado para o recozimento final e ensaio de empolamento das chapas depois de laminadas a frio até a espessura definitiva ( $2,43 \pm 0,02$  mm). A fig. 12 mostra a verificação de espessura das chapas laminadas durante os últimos passes de laminação a frio.

**LIMPEZA E DECAPAGEM FINAL DAS CHAPAS** — Antes dos últimos ensaios não-destrutivos a que eram submetidas as chapas, eram estas cuidadosamente limpas, primeiramente a seco para remoção de eventuais partículas abrasivas, e depois por decapagem ácida, seguida de neutralização alcalina, com dupla lavagem em água destilada. Depois de procedida a secagem eram marcados os bordos para a operação de corte lateral, realizada em serra do tipo "Do-All". Os cortes finais (fig. 13) sòmente foram feitos de-

pois de radiografadas as chapas em suas duas extremidades, a fim de localizar com precisão a posição do núcleo.

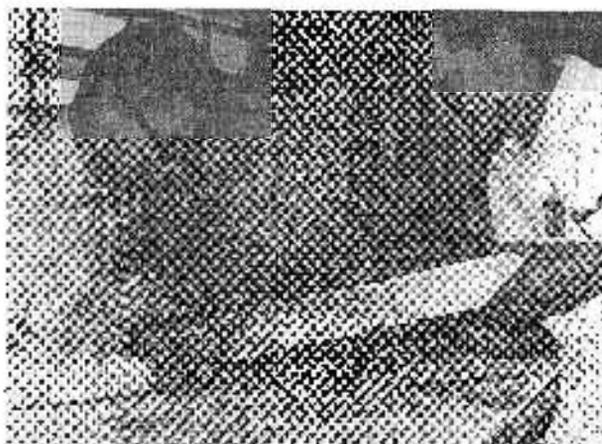


Fig. 12 — Verificação das espessuras das chapas laminadas durante os últimos passes de laminação.



Fig. 13 — Limpeza final das chapas já decapadas para os ensaios não-destrutivos. Notar os envelopes para proteção das chapas durante as operações finais que antecederam à montagem dos elementos combustíveis.

**DIMENSÕES E PESAGEM FINAL DAS CHAPAS** — Uma vez obtidas as radiografias e uma vez concluído o ensaio de verificação da homogeneidade do núcleo, eram as chapas submetidas à operação de puncionamento para a abertura através da qual iriam ser colocados os espaçadores executados em lucita, dentro dos quais iriam passar os dois parafusos em liga 75ST6, para fechamento do conjunto que constitui o elemento combustível propriamente dito.

Na operação de puncionamento foram cuidadosamente recuperados os discos que encerravam a parte correspondente do núcleo deformado.

O núcleo deformado das chapas contendo urânio natural foi de  $592,5 \pm 7,5$  mm, enquanto que o comprimento total dos que continham urânio enriquecido foi de  $602 \pm 3,5$  mm.

As chapas de urânio enriquecido contiveram, em média, 124,7 g de  $U_3O_8$  e 208,1 g de alumínio total, sendo assim a massa média total de 332,8 g por chapa. As chapas contendo urânio natural encerravam 124,6 g de  $U_3O_8$  para 216,4 g de alumínio em média, sendo sua massa total média de 341 g. Assim as chapas contendo urânio enriquecido continham mais U-235 do que fôra especificado e encerravam bastante menos alumínio (cêrca de 17 g a menos), característicos êstes grandemente favoráveis do ponto de vista de economia de neutrons.

Na tabela II foram reunidos os dados principais referentes a 10 chapas produzidas com urânio enriquecido. Mostram os resultados muito boa reprodutibilidade.

principalmente para as operações finais de corte em face das dimensões especificadas, conforme descrito no capítulo 2.

A máquina utilizada foi a de tipo General Electric X-Ray Corporation, modelo F, tipo 4, sob 45 kV através do tubo e sob corrente de 14,5 mA. O filme empregado foi fabricado pela "Dupont", tipo 508 ("Medical Type), cuja sensibilidade foi suficiente para revelar os detalhes que interessavam ao trabalho. A distância entre a chapa e o tubo foi de cêrca de 75 cm e o tempo de exposição foi mantido constante, em 8 s, controlado por sistema automático.

Das 102 chapas produzidas com "cermets" de urânio enriquecido, apenas 5 apresentaram algumas irregularidades, as quais, entretanto, não eram de maior gravidade para impedir seu aproveitamento na montagem dos 6 elementos combustíveis.

Duas chapas, as de números 228 e 281, apresentaram ligeira curvatura de bordo, excedendo o limite tolerável de  $0^\circ 14'$  de desvio máximo da linha reta, o que fazia com que os bordos do

TABELA II — Principais dados referentes à chapas prontas com urânio enriquecido

Nº da chapa	Comprimento do núcleo (mm)	Espessura da chapa (mm)	Massa da chapa furada (g)	$U_3O_8$ na chapa (g)	Al total (g)	% $U_3O_8$ na chapa	$U_{235}$ contido (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	37,41	20,973
268	606	2,41	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

RADIOGRAFIAS DAS CHAPAS — Tôdas as 102 chapas produzidas com urânio enriquecido, bem como cêrca de 70 chapas produzidas com urânio natural, 51 das quais foram utilizadas na montagem dos elementos combustíveis com urânio natural "NAT. 1", "NAT. 2" e "NAT. 3", foram radiografadas em ambas as extremidades para a perfeita delimitação do núcleo e para evidenciar eventuais defeitos que viessem a ser encontrados no núcleo deformado e que não pudessem ser tolerados nos elementos combustíveis.

Para isso foram construídos dispositivos especiais para o posicionamento das chapas, tanto no "chassis" para as radiografias como para a passagem dos dados da radiografia para a chapa,

núcleo se aproximassem bastante dos bordos da chapa, reduzindo-se assim correspondentemente o revestimento lateral. Duas outras chapas, as de números 209 e 275, tinham a extremidade do núcleo exposta no corte, em segmento de comprimento inferior a 8 mm. Essa irregularidade era mais séria, mas, com as precauções adotadas, puderam ser perfeitamente recuperadas. Finalmente uma chapa, a de n.º 216, apresentou exposição do núcleo numa das extremidades, na face do revestimento. Outra chapa, a de n.º 204, teve a extremidade com saliências em bordos opostos, de forma que o corte final da chapa, no comprimento total de 610 mm, interceptou os picos das mesmas.

A chapa n.º 225, durante a laminação, apresentou um dobramento de uma das extremidades, o que ocasionou uma fissura transversal ao ser endireitada.

Tôdas essas irregularidades, bem como a única fissura constatada em tôda a série de chapas produzidas, foram corrigidas com a aplicação do "Devcon", mistura constituída por pó de alumínio e resina plástica de pega rápida, indicada para reparos em materiais a serem submetidos à irradiação nas imediações do caroço dos reatores de ensaios de materiais e de produção de isótopos.

Como proteção final, foram tôdas as chapas revestidas ainda com poliuretano, conforme instruções para a proteção adicional do revestimento dos elementos combustíveis nos reatores "Argonauta".

**CONTRÔLE DA HOMOGENEIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DO URÂNIO NAS CHAPAS PRONTAS** — Antes de serem submetidas as chapas ao puncionamento e após terem sido colocadas em suas dimensões definitivas com auxílio do contrôle radiográfico precedentemente descrito, foram executados os ensaios não-destrutivos de contrôle da homogeneidade de distribuição do urânio nas chapas.

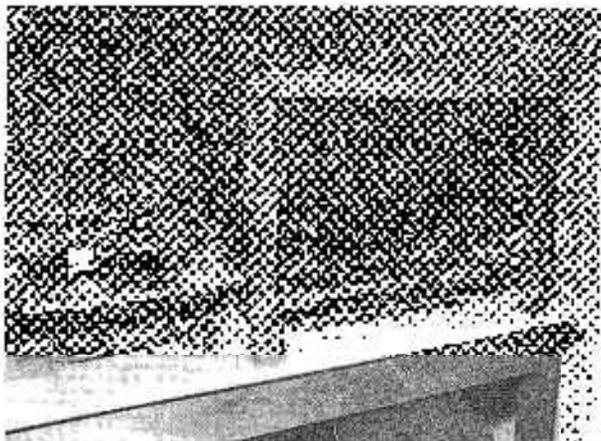


Fig. 14 — Vista do conjunto utilizado nos ensaios não-destrutivos de verificação da distribuição de U-235 nas placas. À direita, o sistema móvel com a unidade colimadora e, à esquerda, a unidade impressora, observando-se o registro já concluído das contagens de duas chapas.

O processo utilizado<sup>8</sup> foi o de mapeamento por meio de um "tracer scanner", da "Tracerlab", com conjunto de contagem, alta tensão e alimentação para o pré-amplificador, fornecidos por um "scaler" 1000, também da mesma firma. O arranjo está mostrado na fig. 14, vendo-se à direita o sistema móvel colimador-contador e à esquerda a unidade impressora. Um dispositivo de servomecanismo permite deslocar o contador de forma a varrer uma faixa de 50 cm de comprimento e de 3 mm de largura com velocidade regulável.

A área total de mapeamento é de 50 × 40 cm. O dispositivo impressor consta de uma pena de 3 mm de largura, a qual é acionada por uma bobina, comandada por um número de contagens pré-determinado. Todo o dispositivo está ligado rigidamente ao conjunto móvel do detector, deslocando-se com a mesma velocidade na unidade de varredura. A impressão do traço é feita por meio da interposição de uma fôlha de papel carbono entre o papel de registro e a pena.

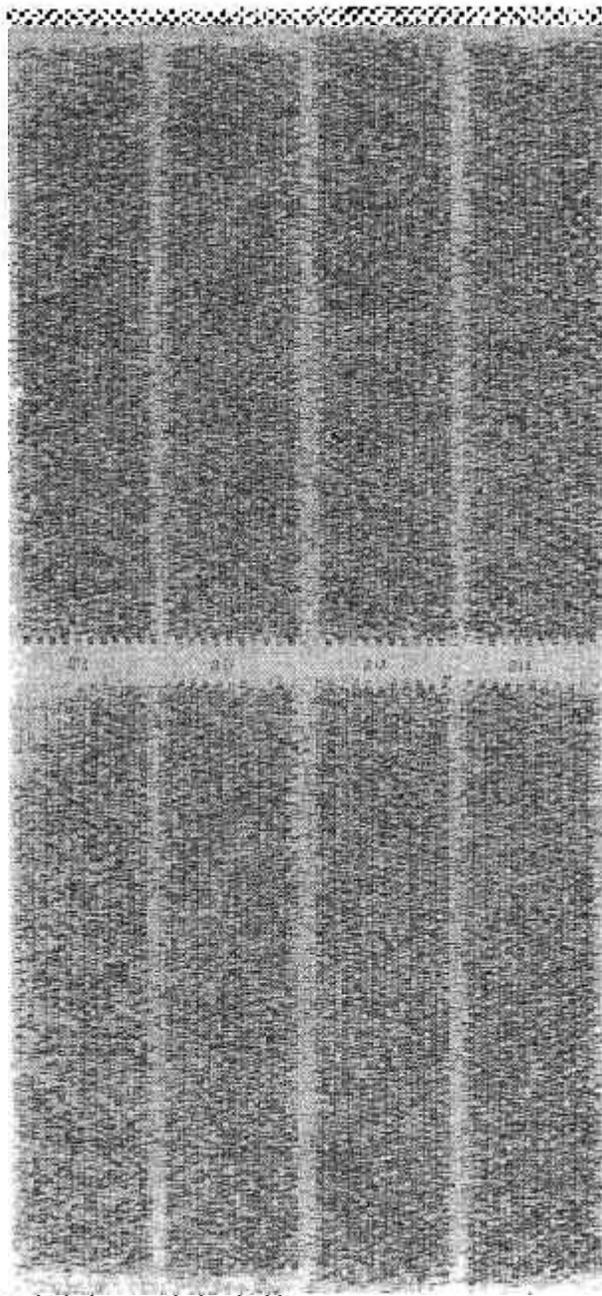


Fig. 15 — Mapeamento das chapas 211, 213, 217 e 218, sob velocidade de deslocamento da unidade colimadora de 2,1 mm/s. Observar a uniformidade da distribuição e a ausência de irregularidades terminais e do defeito conhecido como "dog bonning".

O contador utilizado foi um Geiger em forma de tubo, de 1 cm de diâmetro e de 10 cm de comprimento, sendo de 6 mm o diâmetro da área útil. O colimador, de chumbo, possui uma abertura de  $3 \times 3$  mm e paredes de 5 mm de espessura para blindagem contra radiação externa. A velocidade de deslocamento do contador sobre a chapa foi mantida em 2,1 mm/s. Assim, o tempo necessário para o mapeamento de cada chapa era de aproximadamente duas horas. Os contatos terminais permitiam operar o conjunto automaticamente uma vez iniciada a operação.

A fig. 15 reproduz os resultados de mapeamento em 4 chapas, evidenciando a uniformidade da distribuição de urânio. Revelam ainda esses registros a absoluta regularidade dos bordos extremos das chapas e a ausência das dilatações conhecidas pela designação de "dog bonning", registradas em diversos elementos combustíveis planos, principalmente nos que contêm liga U-Al.

Na Divisão de Metalurgia Nuclear foram conservados os registros referentes a tôdas as chapas produzidas.

**MONTAGEM FINAL DOS CONJUNTOS** — Concluídos os ensaios não-destrutivos e executado o puncionamento após a limpeza final das chapas, foi efetuada a série de operações de montagem dos elementos combustíveis. As peças necessárias, que podem ser vistas na fig. 16, são tôdas produzidas no I.E.A. em liga de alumínio 75ST6, sendo os espaçadores construídos em lucita. Os espaçadores não só permitem manter a distância entre as chapas no elemento combustível, como asseguram a vedação do orifício central. Para aumentar a proteção nessa região e evitar a possibilidade de reação com a água do reator, foi aplicada, em volta dos bordos dos orifícios, uma delgada camada de "Devcon", antes da inserção dos espaçadores de lucita.

**CARACTERÍSTICAS FINAIS DOS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS** — Além dos seis elementos combustíveis contendo urânio enriquecido e que asseguram o funcionamento do reator "Argonauta" do Instituto de Engenharia Nuclear, foram entregues mais dois elementos combustíveis contendo urânio natural, destinados a estudos a serem procedidos no reator, além de mais um que foi conservado no Instituto de Energia Atômica.

Foram assim fabricados nove elementos combustíveis completos.

As tabelas III e IV reúnem os principais dados referentes aos oito elementos combustíveis despachados para o Instituto de Engenharia Nuclear em 27 de outubro de 1964. Verifica-se que os característicos obtidos, comparados aos especificados no capítulo 2, foram homogêneos e excederam os limites indicados quanto ao teor de U-235.

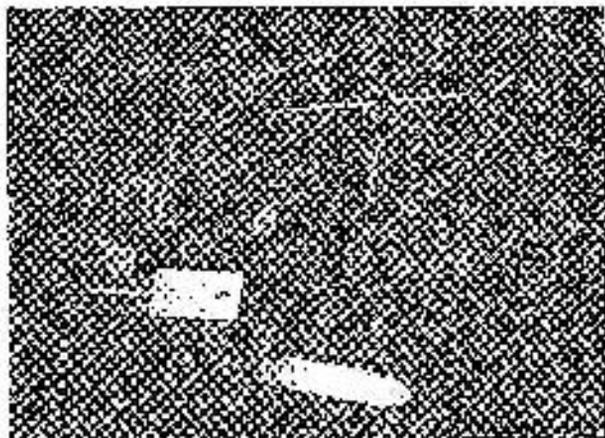


Fig. 16 — Conjunto de peças em liga de alumínio e em "lucita" para a montagem dos elementos combustíveis constituídos de 17 placas. Observar também as chaves especiais para o fechamento dos conjuntos.

TABELA III — Principais característicos dos elementos combustíveis com urânio enriquecido

ESPECIFICAÇÕES	DESIGNAÇÃO DO ELEMENTO COMBUSTÍVEL					
	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
Largura total (mm) .....	73	73	73	73	73	73
Profundidade total (mm) .....	150,5	150,3	150,5	150,2	151,0	151,0
Massa total (g) .....	5860	5860	5845	5830	5825	5825
Massa total de $U_3O_8$ (g) .....	2075,545	2110,552	2118,420	2118,316	2119,228	2119,429
Massa total de Al (g) .....	3581,966	3542,457	3529,690	3531,754	3531,122	3523,442
Média das espessuras (mm) .....	2,43	2,43	2,43	2,43	2,43	2,43
Média das massas das chapas (g) ..	332,795	332,530	332,242	332,357	332,020	331,933
Média das massas de $U_3O_8$ (g) ....	122,011	124,150	124,613	124,607	124,660	124,672
Média das massas de Al (g) .....	210,704	208,380	207,629	207,750	207,360	207,261

TABELA IV — Principais características dos elementos combustíveis com urânio natural

ESPECIFICAÇÕES	Designação do elemento combustível	
	Nat. 1	Nat. 2
Nº de chapas .....	17	17
Altura total (mm) .....	670	670
Largura total (mm) .....	73	73
Profundidade total (mm) ....	151,3	151,0
Massa total (g) .....	5930	5950
Massa total de $U_3O_8$ (g) .....	2022,8	2118
Massa total do Al (g) .....	3733,4	3621,2
Média das espessuras (mm) ...	2,42	2,41
Média das massas das chapas (g)	338,6	337,6
Média das massas de $U_3O_8$ (g)	119,0	124,6
Média das massas de Al (g) ...	219,6	213,0

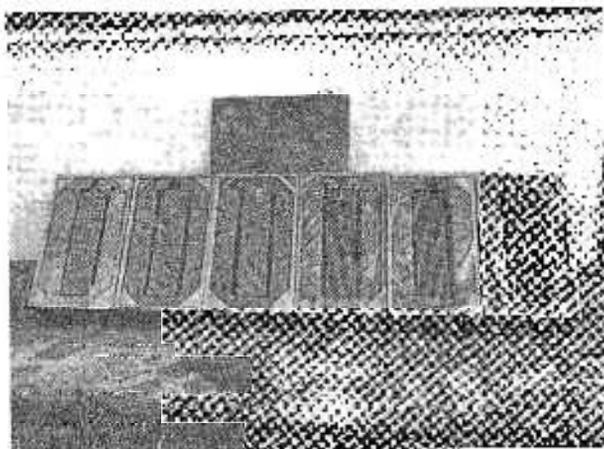


Fig. 17 — Os seis elementos combustíveis com urânio enriquecido, acondicionados para embarque para o reator do Instituto de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro. Observar as precauções tomadas no acondicionamento. Fotografia tomada em 27 de outubro de 1964, data da remessa dos elementos combustíveis.

A fig. 17 mostra o aspecto dos seis elementos combustíveis de urânio enriquecido acondicionados para o embarque, evidenciando as precauções tomadas para se evitar qualquer dano mecânico durante o transporte.

Durante todo o desenvolvimento dos trabalhos de fabricação dos elementos combustíveis, receberam os autores valiosa colaboração do Sr. J. Ferreira, Chefe das Oficinas do I.E.A., que, com proficiência e dedicação, foi incumbido da execução de numerosos dispositivos, além das pe-

ças necessárias à montagem dos conjuntos. Desejam igualmente ressaltar a colaboração recebida do Prof. Dr. Marcello Damy de Souza Santos e do Licenciado Fernando Bianchini, da Divisão de Física Nuclear do I.E.A., em terem imaginado e realizado os ensaios de controle da homogeneidade da distribuição de urânio nas chapas, bem como a contribuição recebida do Sr. Roberto Stasiulevicius na realização do extenso programa de radiografias para controle da posição do núcleo. Registram, por fim, a colaboração recebida durante todo o período dos trabalhos preliminares e durante toda a fase da fabricação dos elementos combustíveis, dos auxiliares técnicos da Divisão de Metalurgia Nuclear e que tiveram parte destacada nas operações descritas, Srs. Arioswaldo Azevedo, Jorge Utimi, Ronildo de Menezes, Waldemar Corvelo da Silva, Domingos de Oliveira e Rubens C. Pezzo.

#### 4. CONCLUSÕES

1. Foram apresentadas as especificações detalhadas dos elementos combustíveis para o reator "Argonauta" do Instituto de Engenharia Nuclear, fabricados nas condições descritas pelos autores, nos laboratórios da Divisão de Metalurgia Nuclear do Instituto de Energia Atômica. Essas especificações resultaram da evolução das especificações originais e previram a fabricação de 6 elementos combustíveis, cada um constituído por 17 chapas de  $610 \pm 0,5$  mm de comprimento,  $65,75 \pm 0,15$  mm de largura e  $2,43 \pm 0,02$  mm de espessura, com revestimentos em cada face de 0,28 mm de espessura, em liga de alumínio 1100, contendo cada chapa  $21,0 \pm 0,2$  g de U-235.

2. Além desses 6 elementos combustíveis com urânio enriquecido, a 19,91% de U-235, e que continham ao todo 10.745,3 g de U total e 2.139,4 g de U-235, foram ainda produzidos mais 3 elementos combustíveis análogos, com concentração natural no isótopo U-235. Dois destes elementos foram também remetidos ao I.E.N. para estudos no reator "Argonauta".

3. O processo de fabricação foi desenvolvido à custa de extenso programa de estudos experimentais, dos quais parte dos resultados já foi objeto de algumas contribuições técnicas apresentadas em congressos no País e no exterior<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup>.

4. Todas as chapas produzidas apresentam revestimento em todas as suas faces. Para evitar a exposição do núcleo nas extremidades, como ocorre quando se utiliza o processo de extrusão, foram as chapas produzidas por co-laminação de conjuntos que encerravam, em moldura, o "cermet" de dispersão  $U_3O_8$ -Al.

5. As operações de manipulação e o controle das massas de  $U_3O_8$  enriquecido (com 19,91% U-235), obtido da "United States Atomic Energy Commission", foram realizadas sempre em "glove-boxes" e em balanças de precisão, tendo sido tomadas as devidas precauções para evitar as perdas no processamento. Na fase de compactação, a perda total registrada foi de apenas 13 mg, e na produção das 102 chapas obtidas finais a perda total foi de 9,4 g de U total e de 1,9 g de U-235.

6. O estudo estatístico feito com auxílio do computador IBM-1620-II do I.E.A., permitiu correlacionar por meio de fórmula semi-empírica o comprimento total do núcleo deformado com a espessura final da chapa, com a altura inicial da moldura e com a altura do "cermet" pré-sintetizado.

7. Todas as 102 chapas produzidas, utilizando os 102 "cermets" fabricados, contendo 54,36%  $U_3O_8$  e 45,64% Al (com a exceção de 4 chapas que continham menor conteúdo de  $U_3O_8$ ), foram utilizadas na montagem dos 6 elementos combustíveis. Nenhuma chapa foi perdida ou rejeitada durante a fabricação ou na fase de montagem.

8. Os ensaios de verificação da uniformidade da distribuição do urânio no núcleo e as radiografias executadas em cada uma das chapas não revelaram defeitos que impedissem a utilização nos conjuntos, nem a existência de irregularidades na homogeneidade da concentração de  $U_3O_8$  na dispersão do núcleo.

## BIBLIOGRAFIA

1. BIDWELL, R. M., HAYDT, H. M., FREITAS, C. T. & SOUZA SANTOS, T. D. — *Nota preliminar sobre propriedades e estrutura de dispersões  $U_3O_8$ -Al*. ABM-BOLETIM, vol. 20, nº 84, pgs. 567-576, 1964.
2. SOUZA SANTOS, T. D., HAYDT, H. M. & FREITAS, C. T. — *Development Studies for Argonaut Fuel Plates Fabrication*. Paper nº 37. Study Group Meeting on the Utilization of Research Reactors, vol. 1, pgs. 279-296, International Atomic Energy Commission, Viena, 1965.
3. SOUZA SANTOS, T. D., HAYDT, H. M. & FREITAS, C. T. — *Experimental Studies on the Fabrication of Thin Fuel Plates with  $U_3O_8$ -Al Cermets*. (Trabalho apresentado à III Conferência Mundial sobre Aplicações Pacíficas da Energia Atômica, Genebra, agosto-setembro, 1964).
4. SOUZA SANTOS, T. D., HAYDT, H. M. & FREITAS, C. T. — *Developments in Fuel Fabrication for Research Reactors in Brazil*. (Trabalho apresentado à III Conferência Mundial sobre Aplicações Pacíficas da Energia Atômica, Genebra, agosto-setembro, 1964).
5. SOUZA SANTOS, T. D., HAYDT, H. M. & FREITAS, C. T. — *Fabricação de elementos combustíveis para o reator Argonauta, do Instituto de Engenharia Nuclear*. METALURGIA, vol. 21, nº 90, pgs. 369-376, maio, 1965.
6. BERGUA, H., FRIDDLE, R., DIAZ, J. & BAIRD, J. — *Fabrication of the ISNSE Fuel Element for Low Power Research Reactors*, pg. 191. *Nuclear Fuel Elements* (ed. H. H. Hausner). Reinhold Publishing Corp., New York, 1959.
7. TID-7025 (vol. 4) *Guide to Nuclear Power Cost Evaluation*, vol. 4. *Fuel Cycle Costs*, pg. 3, seção 440, março, 1962.
8. SOUZA SANTOS, M. D. & BIANCHINI, F. G. — *Ensaio não destrutivo para controle da distribuição de urânio em elementos combustíveis de configuração plana*. Relatório da Divisão de Física Nuclear, Instituto de Energia Atômica, São Paulo, 1965 (a ser publicado).