



**ESTUDO DE FABRICAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS PLANOS  
COM NÚCLEOS DE CÉRMETS DE 65%  $U_3O_8$  - 35% Al,  
REVESTIDOS COM LIGA DE ALUMÍNIO**

*JOSÉ DEODORO TRANI CAPOCCHI, SEBASTIÃO HERMANO LEITE  
CINTRA, ERBERTO FRANCISCO GENTILE*

**PUBLICAÇÃO IEA N.º 178**  
Dezembro — 1968

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

ESTUDO DE FABRICAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS PLANOS COM NÚCLEOS DE CERMETS

DE 65%  $U_{3-8}O_8$ -35% Al, REVESTIDOS COM LIGA DE ALUMÍNIO\*

José Deodoro Trani Capocchi  
Sebastião Hermano Leite Cintra  
Erberto Francisco Gentile

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

Publicação IEA Nº 178

Dezembro - 1968

---

\* Separata de "METALURGIA -REVISTA DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS", vol. 24 - nº 133 ,  
dezembro, p. 913-919, 1968.

Comissão Nacional de Energia Nuclear

Presidente: Prof. Uriel da Costa Ribeiro

Universidade de São Paulo

Reitor: Prof.Dr. Luis Antonio da Gama e Silva

Instituto de Energia Atômica

Diretor: Prof. 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. Theodoreto H.I. de Arruda Souto		

Divisões Didático-Científicas

Divisão de Física Nuclear -

Chefe: Prof.Dr. Marcello D.S. Santos

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 Abrão

Divisão de Engenharia Nuclear -

Chefe: Engº Pedro Bento de Camargo

Divisão de Operação e Manutenção de Reatores -

Chefe: Engº Azor Camargo Penteado Filho

Divisão de Física de Reatores -

Chefe: Prof.Dr. Paulo Saraiva de Toledo

Divisão de Ensino e Formação -

Chefe: Prof. Rui Ribeiro Franco

## RESUMEN

Los autores describen las experiencias realizadas en la División de Metalurgia Nuclear del Instituto de Energía Atómica, en el desarrollo de los estudios para la obtención de placas combustibles, conteniendo núcleo de cerametal con tenores elevados de la fase cerámica. Son relatados los resultados obtenidos en la fabricación de elementos combustibles planos con núcleo de 65%  $U_{38}O_{10}$  y 35% Al, de espesor total de  $1,45 \pm 0,02$  mm, siendo  $0,47 \pm 0,02$  mm el espesor del revestimiento e  $0,51 \pm 0,01$  mm la del núcleo.

Se hace también, una revisión del empleo de elementos combustibles por dispersión de  $U_{38}O_{10}$ -Al, en reactores de alto flujo de neutrones destinados al ensayo de materiales (tipo ATR) o a la producción de elementos transplutónicos (tipo HFIR).

Se resalta, también, la posibilidad de ser usados elementos  $U_{38}O_{10}$ -Al en reactores convencionales de ensayos de materiales (tipo MTR), como una alternativa del uso de elementos con núcleo de aleación Al-U.

## RÉSUMÉ

Les auteurs présentent les expériences effectuées dans la Division de Métallurgie Nucléaire de l'Institut de Energia Atomica, en vue d'obtenir des plaques combustibles contenant un noyau de "cermet" avec une teneur élevée de la phase céramique. Sont aussi décrits les résultats obtenus dans la fabrication des éléments combustibles plats, avec un noyau de 65%  $U_{38}O_{10}$  et 35% Al, leurs épaisseur totale étant de  $1,45 \pm 0,01$  mm à savoir,  $0,47 \pm 0,02$  mm pour l'épaisseur du revêtement et  $0,51 \pm 0,01$  mm pour celle du noyau.

Une révision est faite sur l'emploi des éléments combustibles par dispersion de  $U_{38}O_{10}$ -Al, en réacteurs à haut flux de neutrons, destinés aux essais de matériaux (type ATR) ou à la production des éléments transplutoniques (type HFIR). Les auteurs font ressortir aussi la possibilité d'utilisation d'éléments avec  $U_{38}O_{10}$ -Al en réacteurs conventionnels destinés aux essais de matériaux (type MTR) comme une alternative à l'usage des éléments avec un noyau d'alliage Al-U.

## RESUME

As development of previous work on the fabrication of plate type fuel elements with cermet cores, the authors present the results achieved in the experimental studies carried out with cores with 65 pct  $U_{38}O_{10}$  - 35 pct Al.

The plates produced had a final thickness of  $1,45 \pm 0,02$  mm (cladding:  $0,47 \pm 0,02$  mm; core:  $0,51 \pm 0,01$  mm).

A review of the application of the  $U_{38}O_{10}$ -Al dispersions in advanced testing reactors and in the high flux reactors is made.

Also is pointed out the possibility of using this type of fuel elements in the conventional materials testing reactors, as an alternative to the aluminum-uranium alloy elements.

# ESTUDO DE FABRICAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS PLANOS COM NÚCLEOS DE CERMETS DE 65% $U_3O_8$ -35% Al, REVESTIDOS COM LIGA DE ALUMÍNIO <sup>(1)</sup>

JOSÉ DEODORO TRANI CAPOCCHI <sup>(2)</sup>  
SEBASTIÃO HERMANO LEITE CINTRA <sup>(2)</sup>  
ERBERTO FRANCISCO GENTILE <sup>(2)</sup>

## RESUMO

*Descrevem os autores as experiências realizadas na Divisão de Metalurgia Nuclear do Instituto de Energia Atômica, no desenvolvimento do estudo da obtenção de placas combustíveis, contendo núcleo de cermet com teores elevados da fase cerâmica. São relatados os resultados obtidos na fabricação de elementos combustíveis planos com núcleo de 65%  $U_3O_8$  e 35% Al, de espessura total de  $1,45 \pm 0,02$  mm, sendo  $0,47 \pm 0,02$  mm a espessura do revestimento e  $0,51 \pm 0,01$  mm a do núcleo.*

*É feita, também, uma revisão sobre o emprego de elementos combustíveis por dispersão de  $U_3O_8$ -Al, em reatores de alto fluxo de neutrons destinados ao ensaio de materiais (tipo ATR) ou à produção de elementos transplutônicos (tipo HFIR). É ressaltada, ainda, a possibilidade de serem usados elementos com  $U_3O_8$ -Al em reatores convencionais de ensaio de materiais (tipo MTR), como uma alternativa ao uso de elementos com núcleo de liga Al-U.*

## 1. INTRODUÇÃO

Os reatores nucleares destinados à pesquisa, a produção de radio-isótopos e a ensaios de materiais empregam, em sua maioria, elementos combustíveis à base de urânio enriquecido no isótopo U-235, sendo moderados e arrefecidos por água <sup>1</sup>.

Para a produção de tais elementos combustíveis apresentam-se duas opções. A primeira é a fabricação de elementos com núcleo metálico à base de liga de urânio e alumínio, com teores de urânio variando conforme o grau de enriquecimento. Por exemplo, o IEAR-1, reator do Instituto de Energia Atômica de São Paulo, emprega atualmente, placas contendo núcleo com liga de 45% U e 55% Al, sendo de 20% o enriquecimento do urânio em seu isótopo U-235 <sup>2</sup>. A porcentagem de urânio seria menor, se o enriquecimento superasse a 20%. Assim, para 90% de U-235, a liga poderia ter de 10% a 20% de urânio, apenas, composição esta ao redor do ponto eutético do sistema Al-U (13% U, 640°C) <sup>3</sup>. A segunda opção é a fabricação de elementos à base de dispersões, em que um composto físsil cerâmico ou intermetálico é distribuído numa matriz metálica. Os elementos combustíveis do reator "Argonauta" do Instituto de Engenharia Nuclear da Guanabara, por exemplo, contêm cermets de 54,4% de  $U_3O_8$  e 45,6% de alumínio, sendo de 20% o enriquecimento em U-235 <sup>4</sup>.

A Divisão de Metalurgia Nuclear do Instituto de Energia Atômica de São Paulo promove, presentemente, pesquisas tanto para o estabelecimento de uma tecnologia nacional de fabricação de placas combustíveis à base de ligas de alumínio e urânio <sup>5</sup>, como para o desenvolvimento da técnica de fabricação de elementos combustíveis à base de dispersões de  $U_3O_8$  e pó de alumínio, com teores da fase cerâmica superiores a 55%, em peso <sup>6</sup>.

## 2. UMA REVISÃO DAS DISPERSÕES DE $U_3O_8$ -Al

Não obstante os estudos iniciais sobre elementos combustíveis por dispersão de  $U_3O_8$ -Al remontem à década de 1950, eles foram intensificados a partir de 1960, culminando em 1962 com os projetos de reatores avançados, de alto fluxo de neutrons.

Realizaram-se pesquisas em laboratórios estrangeiros <sup>7, 8, 9, 10</sup> não somente quanto à fabricabilidade dos elementos, que é concernente à maior ou menor facilidade com a qual as placas são obtidas por processos de transformação mecânica, mas ainda, quanto a vários outros característicos metalúrgicos, mecânicos e nucleares.

Alguns pontos abordados nestas pesquisas são: compatibilidade entre a fase cerâmica físsil e a matriz metálica do núcleo; ligação metalúrgica entre núcleo e revestimento; resistência à corrosão do material de revestimento; propriedades mecânicas dos elementos e dos demais materiais de uso no reator; comportamento dos elementos sob ciclos alternados de aquecimento e

(1) Contribuição Técnica n.º 786. Apresentada no XXIII Congresso Anual da ABM; Belo Horizonte, julho de 1968.

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

de resfriamento; transferência de calor; comportamento dos elementos sob irradiação em reator, quando sujeitos a diversos graus de queima ("burn-up").

As dispersões de  $U_3O_8$ -Al são particularmente empregadas em reatores do tipo ATR ("Advanced Testing Reactor"), bem como em reatores do tipo HFIR ("High Flux Isotope Reactor")<sup>11</sup>.

O reator ATR destina-se à irradiação de materiais sob fluxos da ordem de  $10^{15}$  neutrons/cm<sup>2</sup>.s e possibilita o estudo de diferentes configurações combustível/arrefecedor, sob condições de intensa irradiação por neutrons. É um reator de 250 MW térmicos e apresenta algumas peculiaridades de projeto que realçam sobremaneira os requisitos de desempenho de seus combustíveis. Sua elevada densidade de potência (2,6 MW por dm<sup>3</sup> de volume do núcleo) e a velocidade de circulação da água (arrefecedor e moderador) que é de 13,4 m/s, além de introduzirem problemas de ordem térmica e hidráulica<sup>12</sup>, dão uma idéia do nível de solicitação a que estão sujeitos os elementos combustíveis. Os elementos são segmentos de anel com ângulo central de 45°, contendo 19 placas curvas, com centro comum. A espessura total das placas é de 2 mm, com núcleo de 0,5 mm. O material do núcleo é uma dispersão de 34%  $U_3O_8$ -66% Al, sendo superior a 93% o enriquecimento em U-235. O alumínio empregado para matriz da dispersão é pó da liga 8001, sendo a moldura e o revestimento das placas, em liga 8001 ou 6061<sup>12</sup>.

O reator HFIR, de 100 MW térmicos, por seu lado, serve à produção de isótopos de elementos transplutônicos, como amerício, cúrio, berquélio, califórnio, einstênio e férmio.

As etapas de produção constam inicialmente da irradiação em outro reator de alguns quilogramas de Pu-239 para se obter gramas de Pu-242 e, concomitantemente, quantidades menores de Am-243, e Cm-244. Segue-se uma purificação química para se isolar o Pu-242. Fabricam-se, então, alvos deste isótopo, encapsulados em alumínio. Os alvos são colocados no HFIR e irradiados sob fluxos elevados da ordem de  $2$  a  $5 \times 10^{15}$  neutrons/cm<sup>2</sup>.s. Obtêm-se, no decurso de 1 ano, dezenas de gramas de isótopos de cúrio e dezenas de miligramas de isótopos de califórnio. O material irradiado é removido do núcleo do reator e processado quimicamente. Então, são fabricados novos alvos de cúrio que são novamente irradiados, produzindo-se, após 1 ano, 1 g de Cf-252 e quantidades menores de berquélio, einstênio, férmio, além de outros isótopos do califórnio.

Os isótopos dos elementos transplutônicos encontram aplicação no campo da pesquisa fundamental e no campo das aplicações tecnológicas

bélicas e pacíficas da energia nuclear. Como exemplos, o Cm-244, emissor alfa, é utilizado como fonte térmica em dispositivos de conversão direta para suprir de energia elétrica os satélites artificiais; o Cf-252 sofre fissão espontânea, ou seja, seu núcleo se cinde, liberando energia e neutrons, sem o concurso do bombardeio do mesmo por partículas externas. Por este motivo, Cf-252 encontra uso potencial como fonte portátil de neutrons<sup>15</sup>.

Os elementos combustíveis do HFIR são constituídos por anéis concêntricos de placas de forma involuta, contendo núcleo de  $U_3O_8$  disperso em pó de alumínio, com 35% da fase cerâmica nas placas internas e 40%, nas externas. As placas têm 1,27 mm de espessura total, com espessura de revestimento de 0,25 mm. A liga de alumínio usada é a 6061. As solicitações de ordem térmica e hidráulica são análogas as que ocorrem no ATR, uma vez que a densidade de potência é de 1 a 2 MW/dm<sup>3</sup> de volume do núcleo do reator e a velocidade da água circulante é de 12,8 m/s, neste caso.

Tanto os elementos do ATR como os do HFIR contêm quantidades de aproximadamente 0,1% de BC<sub>4</sub> (tetracarboneto de boro), que serve de "veneno queimável" ("burnable poison"). A função do "veneno queimável" é permitir a presença, no núcleo do reator, de uma quantidade de material físsil que supera aquela que poderia ser normalmente governada pelas barras de controle. O B-10, de alta secção de choque de absorção de neutrons térmicos (mais de 6 vezes a do U-235 para neutrons de fissão nuclear), é gradualmente transformado em material de mais baixa secção de choque e sua "queima" compensa as variações de reatividade que ocorrem, progressivamente, com o consumo do elemento combustível. Assim, a vida útil dos elementos é aumentada, o que constitui fato importante para reatores como o ATR e o HFIR em que os elementos são substituídos a intervalos de cerca de duas semanas apenas. As técnicas da metalurgia do pó são adequadas à incorporação dos "venenos queimáveis" aos elementos combustíveis.

Além de reatores com desenvolvimento relativamente recente, como os que foram mencionados, há outros, do tipo MTR ("Material Testing Reactor") e ETR ("Engineering Testing Reactor"), de "piscina" ou "tanque", que podem ter seus elementos combustíveis na forma de dispersões  $U_3O_8$ -Al. Por exemplo, o reator PRPR ("Puerto Rico Pool Type Reactor"), instalado em Mayaguez, Porto Rico (E.E.UU.), com potência nominal de 1 MW térmico, potência específica de 8,9 kW/dm<sup>3</sup> e fluxo de neutrons térmicos máximo da ordem de  $10^{12}$  neutrons/cm<sup>2</sup>.s, tem como combustível, placas do tipo MTR com núcleo de dispersão 65%  $U_3O_8$ -35% Al e revestimento em alumínio. O enriquecimento é de

20% no isótopo U-235. As placas têm 0,46 mm de espessura de revestimento e 0,61 mm de espessura de núcleo, contendo quantidades variáveis de 564 g até 1.129 g de  $U_3O_8$ <sup>16</sup>. Um reator semelhante ao PRPR, mas possuindo elementos combustíveis na forma de liga Al-26% U, é o BRR ("Battelle Research Reactor") do "Battelle Memorial Institute" (EE.UU.). Este reator de 1 MW térmico necessita de material altamente enriquecido (90% U-235)<sup>17</sup>.

Diante do desempenho, plenamente satisfatório, das dispersões de  $U_3O_8$  e Al sob condições tão drásticas, como as vigentes nos reatores ATR e HFIR e da possibilidade de incorporar-se maior quantidade de urânio por unidade de volume do elemento combustível, quando se usam dispersões de alto teor de óxido, justifica-se o esforço para o estabelecimento da tecnologia de

respondente à composição citada, calculada a partir das densidades de seus constituintes, é de 4,83 g/cm<sup>3</sup>. A composição volumétrica equivalente da dispersão é 37,4%  $U_3O_8$ -68,6%-Al.

Os briquetes foram compactados por simples efeito, em prensa hidráulica manual, sob 0,6 t/cm<sup>2</sup>, em matriz de aço, cuja cavidade tem as seguintes dimensões: 50 mm × 65 mm × 51 mm. Após a compactação, os mesmos foram pré-sinterizados a 600°C, durante 1 hora, sob a atmosfera de argônio.

A tabela I fornece os característicos dimensionais dos briquetes paralelepípedicos obtidos, tanto a verde como no estado pré-sinterizado. Constam ainda da mesma, as variações dimensionais ocorridas com o tratamento de pré-sinterização e as porcentagens da densidade teórica alcançadas.

TABELA I — Característicos dos briquetes fabricados

Característicos	C o n d i ç ã o		Variação com a pré-sinterização (%)
	a verde	pré-sinterizados	
Comprimento (cm) .....	5,005 ± 0,002	5,030 ± 0,002	+ 0,45
Largura (cm) .....	6,520 ± 0,002	6,555 ± 0,002	+ 0,54
Espessura (cm) .....	0,608 ± 0,002	0,613 ± 0,002	+ 0,82
Massa (g) .....	68,72 ± 0,03	68,19 ± 0,03	- 0,76
Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) .....	3,47 ± 0,01	3,37 ± 0,01	- 2,8
Porcentagem da densidade teórica .	71,8	69,8	

fabricação de elementos com estas dispersões. Isto possibilitará uma futura escolha, por parte das instituições brasileiras interessadas, quanto ao tipo do elemento que poderia ser adotado num reator como o IEAR-1 ou, eventualmente, em outro, especialmente construído para se proceder a ensaios de materiais.

### 3. PREPARAÇÃO DOS CERMETS

O procedimento experimental adotado na preparação dos briquetes de  $U_3O_8$ -Al, com 65% da fase cerâmica foi análogo ao seguido anteriormente pelos autores, em outra pesquisa<sup>18</sup>.

Em resumo, misturou-se  $U_3O_8$  em pó, com grânulos menores que 44 microns (-325 malhas por polegada), com pó de alumínio 1100, de grânulos menores que 147 microns (-100 malhas por polegada). A dispersão obtida apresentou as seguintes densidades: solta de 1,6 g/cm<sup>3</sup>; limite de 2,7 g/cm<sup>3</sup>. A densidade teórica cor-

### 4. FABRICAÇÃO DE PLACAS

As placas foram obtidas por co-laminação do material do núcleo e de revestimento, sendo os briquetes alojados na cavidade de uma moldura de alumínio 1100 previamente decapada. A seguir soldaram-se, à moldura, placas de revestimento de mesmo material. Constituiu-se, assim, um conjunto com dimensões: 100 mm × 105 mm × 16 mm, a ser laminado segundo à direção correspondente à dimensão de 100 mm.

Inicialmente, procedeu-se à laminação a quente, chegando-se a um produto plano intermediário de espessura igual a 1,60 mm.

A programação da laminação constou de 12 passes com intensidades de redução crescentes atingindo-se, nos passes finais, a redução máxima de 30%. A laminação a frio possibilitou atingir espessuras finais de 1,45 mm para as placas combustíveis. A tabela II contém característicos das placas produzidas.

TABELA II — Características das placas combustíveis contendo núcleo de cermet de 65%  $U_3O_8$ -35% Al

Comprimento da placa (mm) .....	540 ± 1
Largura da placa (mm) .....	79 ± 1
Espessura da placa (mm) .....	1,45 ± 0,02
Espessura do revestimento (mm) .	0,47 ± 0,01
Pêso da placa (g) .....	309,1 ± 0,1
Comprimento do núcleo (mm) ....	520 ± 1
Largura do núcleo (mm) .....	69,8 ± 0,1
Espessura do núcleo (mm) .....	0,51 ± 0,01
Densidade do cermet (g/cm <sup>3</sup> ) .....	3,37 ± 0,01
Porcentagem da densidade teórica .	69,8
Densidade do núcleo deformado (g/cm <sup>3</sup> ) .....	3,84 ± 0,01
Porcentagem da densidade teórica .	79,5
Acréscimo de densidade (%) .....	13,9
Massa do briquete (g) .....	68,245 ± 0,001
$U_3O_8$ contido (g) .....	44,350 ± 0,001
U contido (g) .....	37,616 ± 0,001

Maiores detalhes da técnica empregada na produção de chapas deste tipo, por processo de co-laminação, foram descritos em outra contribuição técnica apresentada pela Divisão de Metalurgia Nuclear<sup>19</sup>.

## 5. ENSAIOS

5.1. *Ensaio de empolamento* — O ensaio de empolamento tem por finalidade examinar a ligação metalúrgica entre o núcleo e o material de revestimento do elemento combustível. Consiste no aquecimento da placa combustível a uma temperatura pré-estabelecida e durante um dado tempo, após o qual a placa é retirada do forno e inspecionada visualmente, observando-se eventuais bolhas que tenham se levantado na superfície.

Não há, ainda, uma norma brasileira para o ensaio. No presente estudo, porém, a temperatura adotada foi de 450°C e o tempo, de 60 minutos.

As placas foram ensaiadas antes de serem laminadas a frio.

5.2. *Gamagrafias* — As radiografias por raios-gama das placas combustíveis possibilitam: avaliar a homogeneidade da dispersão consti-

tuinte do núcleo, observar a ocorrência de fraturas ou de trincas internas e definir precisamente as posições relativas do núcleo e do revestimento.

As gamagrafias foram efetuadas após a laminação a frio. Foi empregada uma fonte de Ir-192, colocada a 1 m de distância do filme, empregando-se ainda, uma tela intensificadora de chumbo com 0,25 mm de espessura. Usou-se filme radiográfico do tipo AA e os tempos de exposição foram de 40 minutos. (Ver figuras 1 e 2).

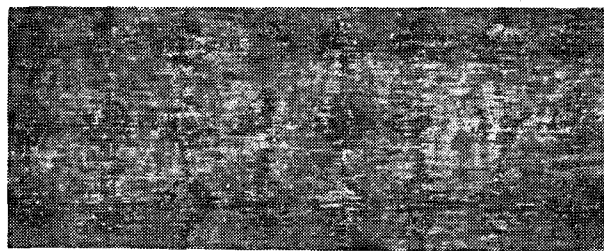


Fig. 1 — Gamagrafia de uma região do núcleo de uma placa contendo um cermet de  $U_3O_8$  (65%) - Al (35%). Fonte de Ir-192; distância fonte-objeto: 1 m; tela intensificadora de chumbo: espessura = 0,25 mm; Filme tipo AA; tempo de exposição: 40 minutos.

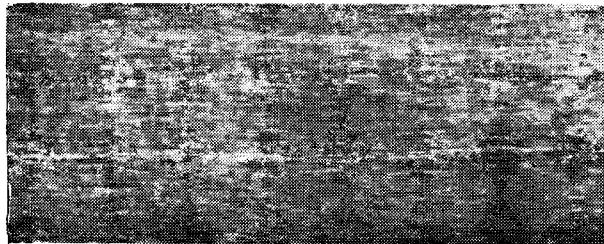


Fig. 2 — Gamagrafia de uma região do núcleo de uma placa mostrando grande heterogeneidade na distribuição de materiais (diferenças acentuadas de enegrecimento) e trincas provocadas durante a fabricação da placa. Gamagrafia obtida sob condições análogas às da Fig. 1.

5.3. *Exames metalográficos* — Os exames metalográficos foram realizados conforme técnica descrita anteriormente<sup>20</sup> e objetivaram a observação da microestrutura do núcleo deformado, principalmente quanto à distribuição dos materiais numa textura orientada pela laminação. Procurou-se observar, também, a região de fronteira entre o núcleo e o revestimento. (Ver figuras 3 e 4).

5.4. *Medidas hidrostáticas* — As medidas hidrostáticas serviram à determinação indireta do volume do núcleo deformado, de sua densidade final e de sua espessura. (Ver tabela II).

Outrossim, deve-se ressaltar que constituem estas medidas um método indireto e não destrutivo de se detectar falhas internas, como trincas

e as provocadas por escoamento diferente do núcleo relativamente ao revestimento.

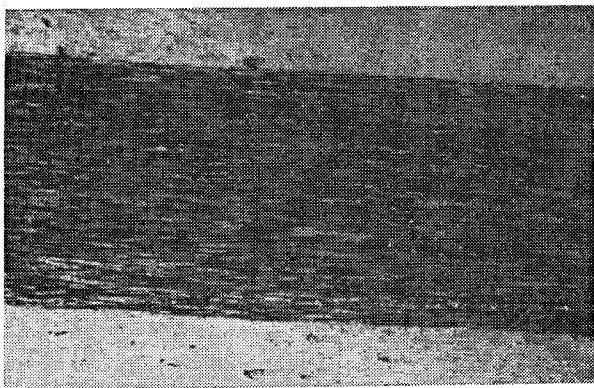


Fig. 3 — Micrografia de um corte transversal, sem ataque, de uma placa combustivel mostrando a textura orientada pela laminação, bem como as células de combustivel (escuras), envolvidas pelo material da matriz (clara). Aumento: 50 X.

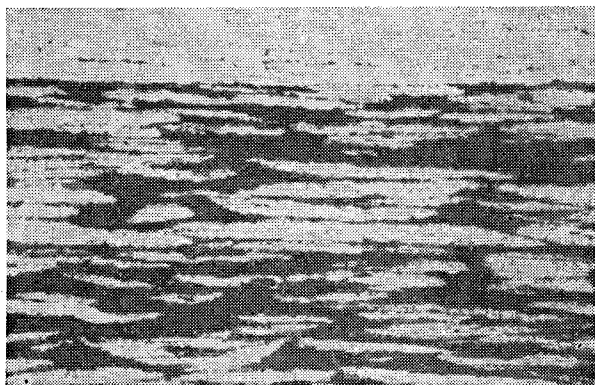


Fig. 4 — Micrografia, sem ataque, detalhando a região da interface núcleo-revestimento da placa. Há ligação metalúrgica perfeita entre as regiões. Aumento: 250 X.

Uma densidade relativamente baixa do núcleo deformado por trabalho mecânico pode significar a ocorrência de solução de continuidade no mesmo.

## 6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados experimentais alcançados reproduzem, satisfatoriamente, os obtidos anteriormente<sup>21</sup>. Os briquetes apresentaram densidades a verde, diferindo de menos de 1% relativamente aos valores já obtidos. A perda de densidade ocorrida com a pré-sinterização, porém, foi de 2,3% anteriormente e de 2,8% no presente estudo. As curvas de pressão de compactação contra densidade a verde levantadas serviram, perfeitamente, ao cálculo das cargas de pó a serem compactadas, a fim de se alcançar a altura especificada para briquetes a verde. As

variações dimensionais verificadas na passagem do briquete do estado verde para o pré-sinterizado possibilitaram manter as mesmas especificações dimensionais adotadas anteriormente.

A laminação das placas combustíveis baseou-se em programação já elaborada, a menos de novos passes introduzidos para maior redução a quente, visando placas mais delgadas. As placas obtidas anteriormente tinham 2,45 mm de espessura final, enquanto que as atuais têm 1,45 mm. A redução total de espessura foi de 84,7% no primeiro caso e de 90,9%, no último.

O trabalho mecânico sobre o núcleo provocou, no mesmo, uma densificação de 13,9%, chegando-se a uma porcentagem da densidade teórica de 79,5%. No estudo experimental anterior, embora se obtivessem placas mais espessas, a porcentagem da densidade teórica alcançada foi de 81,4%, com uma densificação de 14,2%. O resultado atual, aparentemente contraditório, não o é na realidade, já que, no presente caso, partiu-se de densidade mais baixa (3,37 g/cm<sup>3</sup>) em relação à correspondente anterior (3,44 g/cm<sup>3</sup>), além de se ter obtido um núcleo relativamente menos homogêneo.

A figura 2 ilustra um núcleo de placa que contém, além de heterogeneidades de distribuição do combustivel na matriz metálica, uma trinca relativamente grande.

A micrografia da figura 3 ilustra a textura orientada dos grãos que constituem a dispersão, depois do trabalho mecânico. Observe-se a constituição de pequenas células contendo o combustivel, envolvidas pelas partículas deformadas do metal da matriz. Este tipo de combustivel heterogêneo é mais estável à irradiação do que os homogêneos correspondentes<sup>22</sup>.

A micrografia da figura 4 mostra, em maior detalhe, uma região do núcleo mais próxima à interface núcleo-revestimento. A metalografia confirmou a ligação núcleo-revestimento perfeita, já constatada pelo ensaio de empolamento.

A relação entre as espessuras do núcleo e do revestimento foi mantida aproximadamente igual a 1, mas a concentração de urânio por unidade de volume do núcleo aumentou de 8,6%, passando de 0,221 g/cm<sup>3</sup> para 0,240 g/cm<sup>3</sup>.

## 7. CONCLUSÕES

1 — Os resultados experimentais verificados na obtenção de cermets e na laminação de placas, pela técnica de moldura-revestimento, confirmaram a experiência anterior da Divisão de Metalurgia Nuclear quanto às condições de fabricabilidade de chapas contendo núcleos com 65% U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>-35% Al e revestidas com alumínio 1100.

2 — As dispersões de  $U_3O_8$  em alumínio propiciam elementos combustíveis cujo desempenho, mesmo sob condições tão severas como às dos reatores de alto fluxo de neutrons, é totalmente satisfatório.

3 — Os elementos combustíveis, com núcleo de cermet  $U_3O_8$ -Al, podem ser empregados tanto em reatores avançados de ensaios de materiais (tipo ATR) como, também, nos reatores convencionais do tipo MTR.

4 — Não obstante a tecnologia de fabricação destes elementos combustíveis estar já desenvolvida pela Divisão de Metalurgia Nuclear, para a produção e aplicação dos mesmos em reatores, será necessário um controle mais rigoroso de qualidade, com ensaios complementares como: radiográficos com energia equivalente à máxima resolução; mecânicos; de ultra-som; térmicos: transmissão de calor e ciclagem térmica; de corrosão; de comportamento sob irradiação, este implicando na necessidade de laboratório metalográfico "quente".

#### BIBLIOGRAFIA

1. SAWYER, H. F. & LOEWNSTEIN, P. — Nuclear Reactor Fuel Elements-Metallurgy and Fabrication. Apêndice B, p. 690-696. Interscience Publishers, 1962.
2. Reator de Pesquisas. Publicação IEA n.º 1, 1959.
3. CUNNINGHAM, J. E.; BEAVER, R. J.; THURBER, W. C. & WAUGH, R. C. — Fuel dispersions in aluminium base elements for Research Reactors. TID-7546, vol. 1, p. 269-297, USAEC, 1957.
4. SOUZA SANTOS, T. D.; HAYDT, H. M. & FREITAS, C. T. — Principais características metalúrgicas dos elementos combustíveis produzidos para o Reator Argonauta do Instituto de Energia Nuclear. Metalurgia, vol. 21, n.º 97, p. 909-921, dezembro, 1965.
5. CINTRA, S. H. L.; GENTILE, E. F.; HAYDT, H. M. & CAPOCCHI, J. D. T. — Desenvolvimento de placas combustíveis contendo núcleo em liga Al-20%U e Al-20%U-0,8%Si. Metalurgia, vol. 24, n.º 131, p. 781-787, outubro, 1968.
6. CAPOCCHI, J. D. T.; CINTRA, S. H. L. & GENTILE, E. F. — Estudo experimental de fabricação de elementos combustíveis planos contendo núcleos de cermets. Metalurgia, vol. 34, n.º 124, p. 202-212, março, 1968.
7. Research Reactor Fuel Element Conference. 17-19, setembro, 1962, Gatlimburg, Tennessee, EE.UU. TID-7546, vol. 1 e vol. 2, USAEC.
8. Relatórios anuais da "Phillips Petroleum Company". IDO-16574 (1960), IDO-16727 (1961), IDO-16799 (1962), IDO-16934 (1963) e IDO-17037 (1964).
9. Fuel Elements Conference. 18-23, novembro, 1957, Paris, França, TID-7546, vol. 1 e vol. 2, USAEC.
10. Fuel Elements Conference. 14-16, maio, 1958, Gatlimburg, Tennessee, EE.UU., TID-7559, vol. 1 e vol. 2, USAEC.

11. HOLDEN, R. B. — Ceramic Fuel Elements. Cap. IX, p. 186 — Gordon and Breach Science Publishers, N.Y., 1966.
12. VANNOY, W. M. — The Thermal and Hydraulic Design of the The Advanced Test Reactor. TID-7642, vol. 1, p. 75-87, 1962.
13. HEESTAND, R. L.; LEITTEN Jr., C. F. & KNIGHT, R. W. — Fabrication Development of The Advanced Test Reactor Fuel Element. TID-7642, vol. 1, p. 315-337, 1962.
14. SWARTOUT, J. A.; BOCH, A. L.; COLE, T. E.; CHEVERTON, R. D.; ADAMSON, G. M. & WINTERS, C. E. — The Oak Ridge High Flux Isotope Reactor. Proceedings of the Third International Conference on The Peaceful Uses of Atomic Energy, 1964, vol. 7. p. 360-368, ONU, 1965.
15. FERGUSON, D. E. — Transuranium Element Processing. Isotopes and Radiation Technology, vol. 4, n.º 4, p. 321, 1967.
16. Directory of Nuclear Reactors, vol. 5, p. 25.
17. Idem 16, vol. 2, p. 17.
18. Idem 6, p. 202.
19. Idem 6, p. 204.
20. Idem 6, p. 208.
21. Idem 6, p. 209-210.
22. Idem 11, p. 184.

#### DISCUSSÃO

AYRTON FILLETI<sup>(1)</sup> — No trabalho "Desenvolvimento de placas combustíveis contendo núcleo de ligas Al-20%U e Al-20%U-0,8%Si" do grupo da Divisão de Metalurgia Nuclear do Instituto de Energia Atômica de São Paulo, é afirmado que, face ao problema de diferença de plasticidade, seria mais interessante o emprego de outras ligas de alumínio como 8001 e 6061, do que a liga 1100. Gostaria de saber porque, na fabricação de elementos combustíveis planos com núcleo de cermets, se usa pó da liga 8001?

JOSÉ DEODORO TRANI CAPOCCHI<sup>(2)</sup> — Não a utilizamos em nossas pesquisas, mas outros centros que fabricam elementos combustíveis deste tipo empregam pó de liga 8001 como constituinte metálico dos cermets. Os motivos seriam: melhoria de propriedades mecânicas das placas, que são bastante solicitadas mecânica e termicamente num reator, como tivemos a oportunidade de expor; maior resistência à corrosão, minimizando os efeitos de escape de produtos de fissão de alto nível de radioatividade, no caso de eventuais rupturas localizadas do revestimento.

SEBASTIÃO HERMANO LEITE CINTRA<sup>(3)</sup> — Queria completar as informações em torno da utilização da liga 8001 como fase metálica dos cermets. Em

- (1) Engenheiro Metalurgista; Gerente do Departamento de Controle de Qualidade e Embalagem da ALCAN Alumínio do Brasil S.A.; São Paulo, SP.
- (2) Membro da ABM e co-autor da CT; Engenheiro Metalurgista e Nuclear; Pesquisador do IEA; São Paulo, SP.
- (3) Membro da ABM e co-autor da CT; Engenheiro Metalurgista e Nuclear; Pesquisador do IEA; São Paulo, SP.

estudo feito no "Argonne National Laboratory", o comportamento sob radiação de cermets contendo partículas metálicas da liga 8001, foi bem superior ao da 1100. Nesse estudo procurava-se comparar a vantagem de se substituir a liga 1100, que tinha sido anteriormente utilizada, e as conclusões eram que, face à propriedades mecânicas, e à resistência à corrosão, e à resistência aos danos de radiação, a 8001 era preferível.

A. FILLETI — A estranheza é porque a 8001 é liga em desenvolvimento experimental, pois vem precedida por um "X".

J. D. T. CAPOCCHI — Parece que o "Metals Handbook" já suprimiu a letra "X". Também em relatórios mais recentes já foi suprimida a letra "X". Gostaria de saber se ela ainda é experimental ou não. O senhor teria alguma informação a respeito?

A. FILLETI — Não. No Brasil não existe ainda notícia de que realmente ela tenha saído de sua fase experimental. Na ALCAN não recebemos comunicado de nossa matriz de que tenha saído.

HELITON MOTTA HAYDT (4) — Os relatórios mais recentes de laboratórios como o da "Phillips Petroleum Company" já consideram como liga 8001, isto é, sem o X de liga experimental.

WALTER ARNO MANHEIMER (5) — Com relação aos esforços mecânicos existentes nesse sistema, teria duas perguntas: a primeira — as tensões residuais do processo de fabricação, laminação, são removidas de alguma maneira, ou não? A segunda — no caso de persistirem, ou de serem aliadas a esforços oriundos da montagem do elemento, resultaria num problema de corrosão sobre tensão? Se esse problema existe realmente, está sendo estudado de alguma maneira?

J. D. T. CAPOCCHI — Quanto à primeira parte, devo dizer que durante o processo de transformação mecânica, o material é inicialmente laminado a quente, e entre os passes de laminação faz-se um aquecimento, de forma que as tensões são criadas e aliviadas. Mas, no final é feito um ajuste de dimensões a frio, de forma que persistem tensões. A montagem do elemento combustível é uma operação bastante delicada, envolvendo técnicas especiais de conformação e de fixação. Creio que permanecem tensões residuais. Quanto ao problema de corrosão sob tensão, não dispomos, no momento, de dados específicos, mas, como o fluido de arrefecimento é água deionizada, minimizam-se os efeitos da corrosão.

W. A. MANHEIMER — Queria dizer que mesmo com água deionizada, conheço casos, mais especificamente, de aços inoxidáveis, onde teores da ordem, se não me engano, de ppm, de cloretos têm uma influência decididamente nociva.

WLADYMYR SANCHEZ (6) — O nosso reator é refrigerado a água deionizada. Temos elementos combustíveis há dez anos sendo refrigerados e não tivemos ainda o problema específico de corrosão. Tomamos muitas precauções quanto à resistividade e ao pH.

H. M. HAYDT — Complementando as informações devo dizer que os elementos combustíveis do reator de São Paulo são também alodizados. Da mesma maneira alodizamos os elementos combustíveis para o "Re-Suco". Os elementos do "Argonauta" são revestidos com poliuretano.

OTTO WEINBAUM (7) — Queria perguntar duas coisas: se foram observadas deformações nestas chapas, em serviço? E com que aumento o senhor trabalhou no controle da linha de separação entre revestimento e núcleo?

J. D. T. CAPOCCHI — Da literatura sabe-se que o elemento combustível pode sofrer fenômenos de deformação tais como: inchamento (swelling) que consiste numa instabilidade dimensional causada pela presença de gases inertes produzidos na fissão nuclear. Os cermets são menos suscetíveis a este fenômeno. Quanto à segunda parte de sua pergunta, peço ao Eng.º Gentile que a responda.

ERBERTO FRANCISCO GENTILE (8) — O controle micrográfico foi feito com 800 aumentos e o preparo das amostras foi feito pela técnica de polimento-ataque, para evitar que o alumínio mascarasse a linha de separação.

O. WEINBAUM — Polimento com que material?

E. F. GENTILE — Com pasta de diamante.

PAULO GOMES DE PAULA LEITE (9) — Gostaria de ressaltar as conclusões apresentadas pelos autores, principalmente no referente à necessidade do desenvolvimento de ensaios não-destrutivos dos elementos combustíveis. O Instituto de Energia Atômica de São Paulo, no ramo de metalurgia, vem realizando um colossal trabalho, desenvolvendo realmente uma tecnologia própria das mais notáveis. Se vier a fazer elementos combustíveis com cermets, deverá contar com equipamentos de ensaios não-destrutivos para informações complementares. Isto é fundamental, e certamente o Instituto está neste caminho; com a encomenda destes equipamentos. Assim chegará a uma fase de produção de forma tranqüila. Tenho a impressão que é esse o objetivo do Instituto.

J. D. T. CAPOCCHI — O objetivo da Divisão é o desenvolvimento da tecnologia. À medida em que formos solicitados, em que houver um interesse nacional no sentido de uma política nacional de desenvolvimento de energia nuclear, tenho a impressão que poderemos adquirir progressivamente esses equipamentos e que, se dependesse de nós, já estariam em pleno funcionamento.

(4) Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista e Oficial da Marinha; Chefe de Pesquisas da Divisão de Metalurgia Nuclear do IEA; São Paulo, SP.

(5) Membro da ABM e orientador dos trabalhos; Engenheiro Químico; M. Sc. e Ph. D. em Metalurgia pelo Carnegie Inst. Tech.; Professor Assistente e Chefe do Programa de Pós-Graduado de Engenharia Metalúrgica — COPPE, da UFRJ; Rio de Janeiro, GB.

(6) Licenciado em Física; Supervisor do Reator IEAR do IEA; São Paulo, SP.

(7) Membro da ABM; Engenheiro de Máquinas e Doutor Engenheiro; Professor da FEI e Escola Mauá; Conselheiro Científico da Metal Leve S.A.; São Paulo, SP.

(8) Membro da ABM e co-autor da CT; Engenheiro Metalurgista e Nuclear; Pesquisador do IEA; São Paulo, SP.

(9) Membro da ABM e na presidência da sessão; Engenheiro Civil; Professor da EEUFRJ; Chefe do Laboratório de Ensaios Não-Destrutivos do Arsenal da Marinha; Rio de Janeiro, GB.