



**ESTADO ATUAL DOS DESENVOLVIMENTOS TECNOLÓGICOS DE  
COMBUSTÍVEIS NUCLEARES NO INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA**

*THARCISIO D. DE SOUZA SANTOS, CLAUER TRENCH DE FREITAS,  
HELITON MOTA HAYDT, ERBERTO FRANCISCO GENTILE  
e FRANCISCO AMBROZIO FILHO*

**PUBLICAÇÃO IEA N.º 257**  
Dezembro — 1971

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

ESTADO ATUAL DOS DESENVOLVIMENTOS TECNOLÓGICOS DE COMBUSTÍVEIS

NUCLEARES NO INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA\*

Tharcisio D. de Souza Santos

Clauer Trench de Freitas

Heliton Mota Haydt

Erberto Francisco Gentile

Francisco Ambrozio Filho

Divisão de Metalurgia Nuclear

Instituto de Energia Atômica

São Paulo - Brasil

Publicação IEA Nº 257

Dezembro - 1971

---

\* Separata de "METALURGIA - REVISTA DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS", vol. 27, nº 168, Novembro, p. 791-800, 1971.

Comissão Nacional de Energia Nuclear

Presidente: Prof.Dr. Hervásio Guimarães de Carvalho

Universidade de São Paulo

Reitor: Prof.Dr. Miguel Reale

Instituto de Energia Atômica

Diretor: Prof.Dr. Rômulo Ribeiro Pieroni

Conselho Técnico-Científico do IEA

Prof.Dr. Renato Helios Migliorini	}	) pela USP
Prof.Dr. José Augusto Martins		
Prof.Dr. Rui Ribeiro Franco		
Prof.Dr. Theodoro H.I. de Arruda Souto		
		) pela CNEN

Divisões Didático-Científicas

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

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

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

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

Divisão de Engenharia Química -  
Chefe: Lic. Alcídio 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.Dr. Rui Ribeiro Franco

Divisão de Física do Estado Sólido -  
Chefe: Prof.Dr. Shiguo Watanabe

# ESTADO ATUAL DOS DESENVOLVIMENTOS TECNOLÓGICOS DE COMBUSTÍVEIS NUCLEARES NO INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA <sup>(1)</sup>

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

CLAUER TRENCH DE FREITAS <sup>(3)</sup>

HELITON MOTA HAYDT <sup>(4)</sup>

ERBERTO FRANCISCO GENTILE <sup>(5)</sup>

FRANCISCO AMBROZIO FILHO <sup>(6)</sup>

## RESUMO

*O Instituto de Energia Atômica, em sua Divisão de Metalurgia Nuclear, vem desenvolvendo estudos experimentais visando a fabricação de elementos combustíveis para reatores, utilizando materiais nacionais e adaptando às condições vigentes os processos tecnológicos da metalurgia e cerâmica nuclear. Nesta contribuição, os autores passam em revista os trabalhos desenvolvidos, objeto de numerosas publicações anteriores, descrevem os aperfeiçoamentos introduzidos na fabricação de elementos combustíveis de chapa, para reatores de pesquisa e de alto-fluxo, notadamente pelas técnicas de moldura e de co-lingotagem, examinam os principais resultados obtidos na fabricação de pastilhas de  $UO_2$  de alta densidade, tecnologia relacionada com a fabricação de elementos combustíveis para reatores de potência, e descrevem, com os principais dados, a nova usina piloto de cerâmica nuclear, em construção, e o laboratório de materiais especiais e de ensaios, presentemente em fase de projeto final.*

## 1. INTRODUÇÃO

Em 1962 foi implantada no Instituto de Energia Atômica a Divisão de Metalurgia Nuclear, com os objetivos de desenvolver estudos experimentais relacionados com a tecnologia de fabricação de elementos combustíveis para reatores e de formar o pessoal necessário. Os estudos experimentais visaram, desde o início, a utilização de materiais nucleares então em início de produção no País, e a adaptação dos processos conhecidos às escalas de produção que poderiam ser previstas nos desenvolvimentos da energia nuclear no Brasil.

Inicialmente, os trabalhos foram voltados para a fabricação de elementos combustíveis para reatores de pesquisa. Por isso, concentraram-se na fabricação dos elementos combustíveis para o conjunto sub-crítico "Re-Suco", presentemente

instalado na Universidade Federal de Pernambuco, em Recife, e para o reator "Argonauta", construído no Instituto de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro. O primeiro emprega 2.146 kg de pastilhas, de 40 mm de diâmetro, de  $UO_2$  natural, com baixa densidade <sup>(1-4)</sup>; para sua fabricação, partiu-se de diuranato de amônio, produzido na Divisão de Engenharia Química do IEA, por purificação do uranato de sódio, resultante êste do tratamento de urânio contido em monazita. O segundo consta de 6 conjuntos, cada qual dotado de 17 chapas, com núcleo de dispersão  $U_3O_8$ -Al, contendo 54,36%  $U_3O_8$ , o urânio tendo 20% de enriquecimento em isótopo 235; êste material foi fornecido, na forma de  $U_3O_8$ , à Comissão Nacional de Energia Nuclear pela U. S. Atomic Energy Commission; as placas são revestidas por liga 1100 de alumínio e foram produzidas pelo processo de moldura.

Êsses desenvolvimentos, bem como outros que serão passados em revista a seguir, foram objeto de numerosos trabalhos apresentados não só aos últimos oito Congressos Anuais desta Associação como também a conferências e simpósios sôbre a especialidade, realizados no exterior. A maior parte dessas publicações do IEA está relacionada na bibliografia do presente trabalho.

Outras atividades importantes em metalurgia nuclear compreenderam:

- (1) Contribuição Técnica n.º 959. Apresentada ao XXVI Congresso Anual da ABM; Rio de Janeiro, GB; junho/julho de 1971.
- (2) Conselheiro da ABM; Chefe da Divisão de Metalurgia Nuclear; Instituto de Energia Atômica; São Paulo, SP.
- (3) Membro da ABM; M.Sc em Engenharia Cerâmica; Divisão de Metalurgia Nuclear, Instituto de Energia Atômica; São Paulo, SP.
- (4) Membro da ABM; M.Sc em Engenharia Metalúrgica; Divisão de Metalurgia Nuclear, Instituto de Energia Atômica; São Paulo, SP.
- (5) Membro da ABM; Mestre em Engenharia Metalúrgica; Divisão de Metalurgia Nuclear, Instituto de Energia Atômica; São Paulo, SP.
- (6) Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista; Divisão de Metalurgia Nuclear, Instituto de Energia Atômica; São Paulo, SP.

- 1) metalurgia de produção de urânio metálico e de ligas à base de urânio, por redução de  $UF_4$  por magnésio <sup>(11-14)</sup>;

- 2) produção de tório metálico e de ligas de tório, por redução de  $\text{ThO}_2$  por cálcio e por magnésio, neste caso em sistemas líquidos metálicos <sup>(11, 15, 16)</sup>;
- 3) estudos de produção de pastilhas de soluções sólidas contendo óxido de tório, notadamente de  $\text{ThO}_2\text{-UO}_2$  <sup>(17-19)</sup> e por dispersões  $\text{UO}_2\text{-ThO}_2\text{-Al}$  <sup>(20, 21)</sup>;
- 4) estudos de fabricação de fontes antimônio-óxido de berílio; <sup>(22)</sup>
- 5) estudos metalográficos de urânio e de ligas a base de urânio, inclusive de ciclagem térmica <sup>(23-27)</sup>;
- 6) estudos de fabricação de chapas combustíveis contendo núcleos de ligas Al-U <sup>(28-30)</sup>; e, por fim
- 7) estudos de reprocessamento pirometalúrgico de placas combustíveis contendo dispersões <sup>(31, 32)</sup>.

A maior parte das atividades de desenvolvimento de elementos combustíveis, vem sendo entretanto concentrada em duas linhas de trabalho:

- 1) aperfeiçoamentos na fabricação de combustíveis nucleares planos, constituídos por núcleo de dispersão e revestidos por liga de alumínio, visando principalmente futuro emprego em reatores de alto fluxo <sup>(33, 37)</sup>; e
- 2) produção de pastilhas de  $\text{UO}_2$  de alta densidade, ou de soluções sólidas, e montagem das mesmas em elementos combustíveis <sup>(38-42)</sup>, relacionados com os programas da Comissão Nacional de Energia Nuclear.

Constituindo a formação e aperfeiçoamento de pessoal um dos importantes objetivos do IEA, é natural que parte das atividades seja voltada para esse campo, não só em pessoal de nível médio, como de engenheiros metalurgistas especializados nos problemas de metalurgia e de cerâmica nuclear. Para isso, colabora em cursos de pós-graduação (mestrado e doutorado) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Presentemente todos os membros do corpo técnico da Divisão têm grau de Mestre em Ciências ou em Engenharia Cerâmica ou Metalúrgica ou estão concluindo suas teses de doutoramento ou dissertações de mestrado. Dentre os mestrados recentes realizados naquela Escola na área de Engenharia Metalúrgica, três se referiram a dissertações em metalurgia nuclear, cujos trabalhos experimentais foram totalmente realizados nos laboratórios da Divisão.

Além da rápida síntese feita sobre os trabalhos desenvolvidos, constituem objetivos desta contribuição examinar os aperfeiçoamentos introduzidos na tecnologia de fabricação dos elementos combustíveis de chapa e de pastilhas de  $\text{UO}_2$ , descrever as soluções adotadas nesses aperfeiçoamentos, examinar e discutir os resultados obtidos, e, por fim, mostrar os aspectos mais significativos dos programas de desenvolvimento, com a nova usina piloto de cerâmica nuclear, em adiantada construção, e com o novo laboratório de materiais especiais e de ensaios, em fase de projeto final.

## 2. ENSAIOS UTILIZADOS NOS ESTUDOS DE PÓS CERÂMICOS

Antes de examinar os desenvolvimentos mais recentes nas duas linhas de pesquisas tecnológicas mencionadas, pela sua importância, convém analisar, embora rapidamente, os processos empregados atualmente na caracterização dos pós cerâmicos, quer se destinem eles a uso nas dispersões, para núcleos de chapas, quer sirvam para a fabricação de pastilhas de  $\text{UO}_2$  de alta densidade.

Como já tem sido mostrado em trabalhos anteriores, as propriedades dos pós têm grande importância no comportamento do material durante a sua fabricação e emprego futuro no reator. Por isso, vêm sendo estudadas sistematicamente do ponto de vista experimental, procurando-se nesses estudos estabelecer-se a correlação desse comportamento com os resultados de numerosos ensaios de caracterização e com as observações que podem ser feitas por meio de exames microscópicos, não só de microscopia óptica como por meio de microscopia eletrônica.

A Divisão de Metalurgia Nuclear tem preparado os pós cerâmicos necessários,  $\text{U}_3\text{O}_8$ ,  $\text{UO}_2$  ou  $\text{ThO}_2$ , a partir dos sais purificados correspondentes, diuranato de amônio (a purificação sendo efetuada pela Divisão de Engenharia Química) e sulfato, ou oxalato, de tório (produção pela Administração da Produção da Monazita, em São Paulo, órgão da CNEN). Variando as condições de produção desses óxidos, pode-se produzi-los com propriedades cujos índices característicos se distribuem por ampla faixa de valores, permitindo assim que se otimizem as condições de sua produção.

Inicialmente, todo o diuranato de amônio (DUA) empregado provinha de processo de purificação por resina de troca iônica, em solução de sulfato de urânio. O sal assim obtido (designado DUA-S) retinha certa proporção de sulfato, o que de certa forma contribuía para determinados característicos dos pós obtidos. Mais recentemente foi o processo modificado, passando para purificação por extração por solvente, a partir de solução de nitrato de urânio; esse sal é designado DUA-N.

Tanto a calcinação do sal a  $\text{U}_3\text{O}_8$  como sua subsequente redução a  $\text{UO}_2$ , esta realizada em atmosfera de hidrogênio, são operações que podem ser conduzidas em condições de temperatura e de tempo bastante diversas, do que resultam característicos diferentes para os pós cerâmicos obtidos.

Os ensaios empregados na caracterização dos pós cerâmicos são:

- 1) *Relação O/U* — Como os pós de  $\text{UO}_2$  para sinterização devem ser hiperestequiométricos, é importante se conhecer o valor da relação O/U, não só nos pós recém-reduzidos, como nos pós estocados e nas pastilhas de  $\text{UO}_2$  produzidas. A determinação é feita na Divisão de

Engenharia Química, por método analítico de via úmida, através da determinação de U total e U hexavalente.

2) *Densidade das partículas* — O processo adotado foi baseado no desenvolvido no Oak Ridge National Laboratory<sup>(34)</sup>. Consiste essencialmente em utilizar, para  $UO_2$ , um picnômetro de 20 ml, termômetro, tubo de enchimento e campânula, a qual é evacuada para a introdução de mercúrio. Para a determinação da densidade de pós de  $U_3O_8$  utiliza-se tolueno em lugar de mercúrio.

3. *Tamanho médio da partícula* — O permeâmetro designado "Fisher Sub Sieve Sizer" é utilizado para a determinação do tamanho médio das partículas. O ar é forçado através da amostra, previamente compactada de determinadas formas, em recipiente apropriado. A perda de carga é indicada por manômetro de água. A sensibilidade do aparelho é para a faixa 0,2 a 50  $\mu$  de diâmetro médio.

4. *Área específica* — Utiliza-se o processo BET modificado, de adsorção gasosa em nitrogênio, utilizando-se hélio para o arrastamento. O equipamento foi fornecido por um firma especializada de São Paulo, e por ela construído; consta, essencialmente, de uma unidade de cromatografia gasosa, de um forno elétrico para a degaseificação da amostra, e de uma unidade registradora e integradora. A adsorção é feita à temperatura do nitrogênio líquido. O método de medida adotado foi descrito em detalhe em apêndice de recente trabalho de autoria de técnico da Divisão<sup>(42)</sup>.

5. *Análise térmica diferencial* — Tem sido utilizada como meio auxiliar para a interpretação dos comportamentos dos óxidos, através da posição e da altura dos picos registrados. Os ensaios têm sido realizados pela Seção de Cerâmica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

6. *Microscopia óptica* — Os exames são realizados com auxílio do microscópio metalográfico Leitz MM-5 da Divisão e o material é preparado sobre lâmina de vidro, promovendo-se a dispersão com auxílio de ultrassom, durante 5 min., com álcool.

7. *Microscopia eletrônica* — A microscopia eletrônica dos pós foi realizada no Centro de Microscopia Eletrônica, anteriormente subordinado à Escola Politécnica da USP, por meio de réplica pré-sombreada com carbono, em microscópio Siemens Elmiskop I. Deposita-se inicialmente uma película de platina, de 100 Å, sobre o material espalhado em placa de vidro, e em seguida, um filme de carbono, contínuo e espesso. A réplica é retirada, recortada e colocada em HF concentrado, para dissolução do  $UO_2$ ; em seguida é montada no suporte apropriado e examinada sob 80 kV.

### 3. ENSAIOS UTILIZADOS NOS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS DE CHAPAS

Os ensaios utilizados para caracterizar os elementos combustíveis planos, constituídos por chapas contendo núcleo de dispersão de fase cerâmica com alumínio e revestidas por alumínio, ou liga de alumínio, são os seguintes:

- 1) determinação de densidade do núcleo;
- 2) distribuição, localização e características da dispersão, no núcleo da chapa acabada, por radiografia ou por gamagrafia;
- 3) distribuição do urânio, por cintilometria-gama;

4) ensaio de empolamento (blister test), por meio de aquecimento da chapa acabada durante 2 h e 450°C ao ar e exame de eventuais bôlhas;

5) ensaio de ciclagem térmica; e

6) ensaio de dobramento alternado.

Os quatro primeiros ensaios são bastante conhecidos na literatura especializada, motivo pelo qual não necessitam maior análise.

*Ensaio de ciclagem térmica* — O aparelho para ciclagem térmica foi projetado e construído na Divisão de Metalurgia Nuclear<sup>(24)</sup>. Consiste essencialmente em dois tanques em paralelo, um contendo água à temperatura ambiente e outro à temperatura ajustável entre 80 e 93°C e de um dispositivo de transferência de chapa, ou conjunto de chapas, de um para outro tanque; ambos os tanques têm água deionizada e um reservatório ligado por termo-sifão ao tanque de água quente, permite compensar as perdas por evaporação. As figuras 1 e 2 mostram o aspecto desse aparelho. Um dispositivo comandado por excêntricos e contra-pesos permite, através de motor elétrico e redutor de velocidade, realizar os ciclos desejados. Nas atuais condições de operação, o ciclo consiste em imergir durante 6 min na água quente, retirar a chapa durante 1 min e mergulhá-la em água fria, onde permanece mais 1 min, e voltar ao tanque de água quente em 3 min; repetem-se a seguir as operações, automaticamente. Um contador permite registrar o ciclo completo. O aparelho funciona 24 h/d e assim, em tempo relativamente curto, podem ser realizadas grandes séries de ciclos.

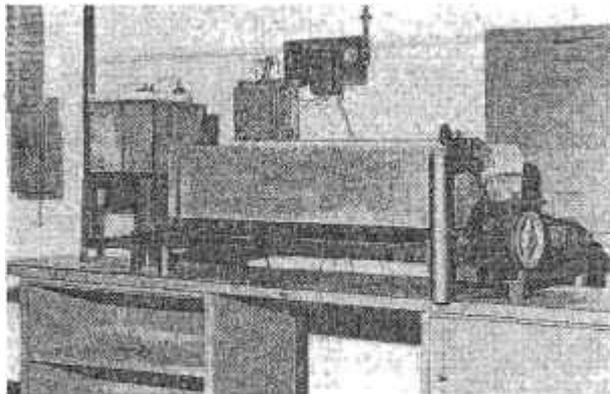


Fig. 1 — Aparelho para ensaio de ciclagem térmica, desenvolvido e construção na Divisão de Metalurgia Nuclear. À esquerda nota-se o tanque de alimentação de água deionizada ao tanque de água quente.

*Ensaio de dobramento alternado* — Para avaliar a qualidade da ligação núcleo-revestimento, foi desenvolvido um ensaio que consiste, essencialmente, em dobrar a chapa sobre um mandril, segundo ângulo de 90°, endireitá-la a seguir em um dispositivo dotado de massa constante e girável em uma charneira e dobrá-la novamente a 90°, porém em direção oposta; depois de novo endireitamento o ciclo de dobramento é repetido. O mandril tem diâmetro que é determinado múltiplo da espessura do núcleo. O número de ciclos a que a chapa resiste antes de evidenciar início de descascamento entre o revestimento e o núcleo, facilmente perceptível ao exame visual, consiste numa medida da qualidade do caldeamento núcleo-revestimento. Esse ensaio tem se mostrado

particularmente sensível a variações de intensidade do aquecimento, dentro de limites amplos, e que em alguns casos, correspondem a até 31 ciclos de dobramento.

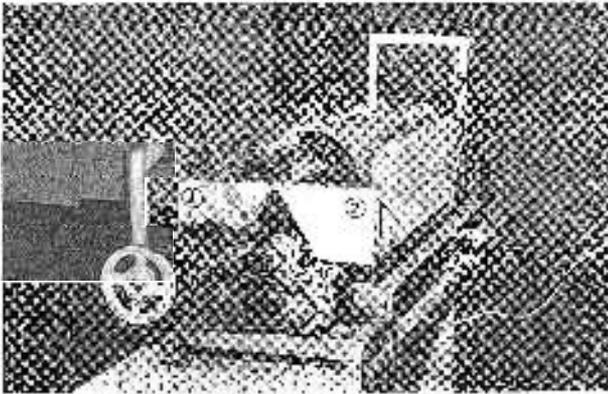


Fig. 2 — Detalhe do aparelho, mostrando: os tanques de água fria (1) e de água quente (2); a localização da placa de aquecimento (3); a chapa-elemento combustível suspensa no conjunto (4) ao passar de um para outro tanque; o redutor de velocidade (5) ligado ao motor elétrico (6); ao fundo, o tanque de alimentação de água (7) ligado por termo-sifão.

#### 4. ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS DE CHAPA PELO PROCESSO DE MOLDURA

A fabricação de elementos combustíveis de chapa contendo núcleo de dispersão de fase cerâmica com alumínio, e revestida por liga de alumínio, tem sido objeto de sistemático e contínuo desenvolvimento pela Divisão. Os estudos experimentais citados anteriormente foram baseados no processo dito "de moldura" (picture frame), e que consiste, essencialmente, em se produzir combustíveis por aquecimento por laminação, a partir de conjunto soldado, e constituído por um quadro vasado, dentro do qual é inserido um corpo prismático de dispersão, recobertas ambas as faces do quadro por chapas de alumínio.

Os estudos experimentais abrangeram dispersões de  $U_3O_8$  — Al desde 20 até 75%  $U_3O_8$ ; dispersões de  $ThO_2$ - $UO_2$ -Al e de  $ThO_2$ - $U_3O_8$ -Al desde 20 até 50% de fases cerâmicas; placas com núcleos múltiplos, 2 ou 4, com o objetivo de confirmar, em determinadas regiões do elemento combustível, os gases de fissão; e ainda, grande variedade de espessuras, desde 0,7 até 2,5 mm.

O núcleo é confeccionado pela técnica de metalurgia de pó. Misturam-se intimamente o pó cerâmico com o alumínio, colocando-os em recipiente cilíndrico de plástico, montado em sistema de rotação, e carregando rolhas de borracha na mistura, para maior densificação. A mistura assim obtida é em seguida compactada em corpo prismático, geralmente de 32x64 mm e altura variável, em prensa hidráulica com matriz apro-

priada, sob pressões variáveis entre 1 e 5 t/cm<sup>2</sup>. Os corpos compactados são depois enrolados em delgada folha de alumínio, para evitar perda de material na manipulação e erosão pelo jato líquido, no caso particular do processo de co-lingotagem, adiante descrito.

Os exames metalográficos de chapas obtidas por este processo revelaram que, quando o pó de  $U_3O_8$  é fino e de grande superfície específica, o compactado resultante é pouco denso, possuindo até 12,5% de poros fechados. Quando laminado subsequentemente, o conjunto revela sucessão de trincas no exame radiográfico e variações cíclicas de espessura do núcleo deformado, reveladas pela microestrutura da amostra cortada longitudinalmente. Quando submetidas ao ensaio de ciclagem térmica, tais chapas evidenciam apreciável reação entre os constituintes do núcleo. A figura 3 mostra o aspecto típico dessa distribuição indesejável, mostrando a localização da fase cerâmica nos contornos dos grãos da fase metálica alongada.

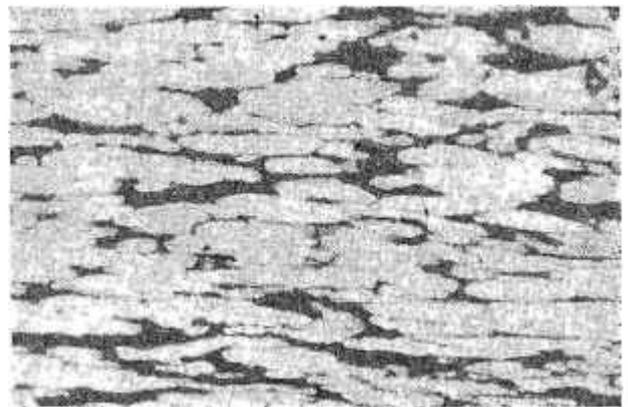


Fig. 3 — Microestrutura de seção transversal de núcleo, contendo 55%  $U_3O_8$ , de chapa laminada, dos primeiros trabalhos desenvolvidos, mostrando a segregação do  $U_3O_8$  fino nos contornos dos grãos alongados de Al. Essa estrutura é indesejável. 100 X.

Para eliminar esse inconveniente, foram produzidas, especialmente, diversas partidas de pós de  $U_3O_8$  de alta densidade, por meio de desintegração de pastilhas sinterizadas ao ar, a 1400°C e durante 3 h; o pó resultante foi classificado entre 150 e 325 mesh. O material assim obtido era constituído de grãos proximalmente equidimensionais, com superfície de apenas 0,05 m<sup>2</sup>/g e tendo densidade aparente de 8,3 g/cm<sup>3</sup>. Técnicas análogas permitiram obter grânulos de soluções sólidas  $ThO_2$ - $U_3O_8$ .

Diversas séries de chapas experimentais produzidas com pós com esses característicos físicos, e correspondentes a núcleos de 55%  $U_3O_8$ -45% Al, e laminadas até a espessura final de 1,20 mm (com núcleo de 0,52 mm e revestimento em cada

uma das faces de 0,39 mm) foram submetidas aos ensaios de empolamento e de ciclagem térmica. Não evidenciaram defeitos no primeiro ensaio e resistiram sem defeitos discerníveis à vista depois de 500 ciclos no aparelho descrito, entre temperaturas de 30 e 83°C.

Os resultados que continuam a ser obtidos no IEA indicam serem essas chapas plenamente satisfatórias para reatores de pesquisa, confirmando a experiência já consolidada a respeito. Mostram igualmente a importância do estreito e sistemático controle das variáveis, e principalmente dos característicos físicos da fase cerâmica, sobre as propriedades do elemento combustível e sobre o seu comportamento durante a fabricação.

## 5. ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS DE CHAPA PELO PROCESSO DE CO-LINGOTAGEM

A Divisão de Metalurgia Nuclear desde o início de seus trabalhos referentes à fabricação de elementos combustíveis de chapa contendo dispersão de  $U_3O_8$ -Al para o reator Argonauta<sup>(5-7)</sup> estudou o processo que ficou conhecido pela denominação de "co-lingotagem" (cast cladding). Esse processo tem recebido menor atenção na literatura técnica estrangeira<sup>(41)</sup> em comparação com os trabalhos dedicados à técnica de moldura. Essa situação pode ser compreendida pelo êxito que teve o processo de moldura na fabricação de elementos combustíveis para reatores de pesquisa, mesmo pela Divisão<sup>(9, 10)</sup>, e por fornecer elementos combustíveis que satisfazem especificações bastante exigentes. Não obstante esses elementos, quando se considera com maior rigor a questão da ligação ou do caldeamento entre o núcleo e o revestimento, principalmente nos casos em que aquele é constituído por dispersão, surge a necessidade de se melhorar a qualidade do elemento combustível.

A experiência dos autores nesse campo indica que o ensaio de empolamento (blister test), antes mencionado, e frequentemente utilizado, nem sempre fornece uma indicação segura quanto à qualidade desse caldeamento. O emprêgo de ensaio de dobramento alternado, conforme foi descrito, demonstrou que, em certos casos, chapas que satisfaziam o ensaio de empolamento, apresentavam de fato um caldeamento fraco entre o núcleo e o revestimento. A intensidade ou a perfeição desse caldeamento deverá ter, segundo acreditam os autores, grande importância no coeficiente de condutibilidade térmica do núcleo ao exterior da chapa.

Pareceu aos autores que o processo de co-lingotamento oferece reais possibilidades de melhoria do caldeamento das chapas resultantes de tais lingotes, em virtude do estado de compressão em que se encontra o núcleo, primeiramente pela solidificação do alumínio líquido vasado em sua vol-

ta, e depois pelo resfriamento do mesmo. Como conseqüência desse melhor envolvimento, os lingotes podem ser laminados em temperaturas mais baixas do que as necessárias para provocar o caldeamento dos conjuntos de moldura. Essa diminuição sensível da temperatura de trabalho possibilita a utilização de  $UO_2$ , em lugar de  $U_3O_8$ , no núcleo, cuja reatividade com o alumínio é muito elevada nas temperaturas utilizadas no processo de moldura. Essa análise, bem como de resultados experimentais obtidos mais recentemente, em extenso programa de trabalhos que se acha em andamento, consta de outro trabalho apresentado a este Congresso<sup>(46)</sup>.

Anteriormente encontraram os autores dificuldade na centragem do compactado na lingoteira. Essa dificuldade foi resolvida pela melhor distribuição dos esforços transmitidos pelos parafusos de posicionamento do núcleo, através de chapas de alumínio de 1 mm de espessura, dispostas nos lados do núcleo.

Comprovou-se que a formação de vazios de solidificação pode ser eliminada pelo vazamento do alumínio a temperatura não superior a 700°C; temperaturas mais elevadas ocasionam vazios de retração; além disso, ocasionam frequentemente ruptura do núcleo, atribuída à concentração de esforços pela dilatação dos parafusos ou aos gradientes muito acentuados de tensões térmicas.

Os lingotes são gamagrafados e, depois de localizados os vazios de topo, são usinados para eliminação dos defeitos superficiais. A laminação a quente é realizada com passes variáveis, em geral em torno de 20% por passe, e em temperaturas de 520-550°C, muito embora em alguns casos resultados igualmente bons tenham sido obtidos por laminação somente a 400°C.

Conforme aliás já era conhecido dos autores, pelos trabalhos mais recentes pela técnica de moldura, comprovou-se ser crítica a influência da natureza e dos característicos do pó da fase cerâmica da dispersão, quando o objetivo é a fabricação de chapas de alta qualidade. Quando o pó de  $U_3O_8$  apresenta baixa densidade e grande superfície específica, a estrutura correspondente da dispersão revela grande tendência de alinhamento (stringering) e de desuniformidade na distribuição do constituinte cerâmico. As microestruturas revelam distribuição muito melhor quando se empregam pós de  $U_3O_8$  ou de  $UO_2$  de alta densidade; aliás isso já foi mostrado para  $U_3O_8$ , bem como para soluções sólidas com  $ThO_2$  nas micrografias 4 e 5. A figura 6 mostra a boa distribuição conseguida com núcleo contendo  $UO_2$  na dispersão.

Um dos resultados que parecem realmente importantes no desenvolvimento do processo de co-lingotagem<sup>(45)</sup> foi a fabricação de chapas combustíveis com núcleo de 30%  $UO_2$  com alumínio.

Tôdas as micro-estruturas produzidas com pós densos de  $UO_2$  revelam pequena tendência de alinhamento, e a densidade do núcleo, depois de laminada a chapa a  $550^\circ C$ , atingiu 99,6% da densidade teórica. Nesses casos, a gamagrafia mostrou boa distribuição do núcleo laminado e o ensaio de empolamento, a  $450^\circ C$  durante 2 h, indicou ser satisfatória a ligação.



Fig. 4 — Microestrutura de seção transversal de núcleo de chapa, obtida pelo processo de moldura, contendo 30%  $U_3O_8$ , depois de submetida a 1000 ciclos. Notar a inexistência de reação. 80 X.

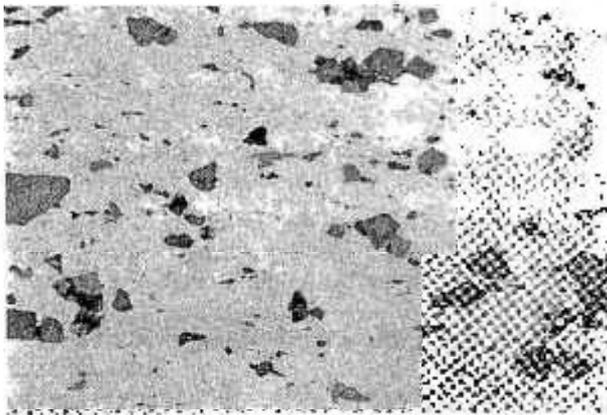


Fig. 5 — Microestrutura de seção transversal de núcleo de chapa laminada com núcleo de 30%  $ThO_2-UO_2$  e alumínio. 100 X.

É provável que a completa inexistência de reatividade constatada pelos autores entre  $UO_2$  e Al do núcleo durante a fabricação e o ensaio de ciclagem térmica, para até 1000 ciclos, resulte dos característicos do pó de  $UO_2$  utilizado; neste caso, o pó foi obtido pela fragmentação de pastilhas que haviam sido sinterizadas sob argônio a  $1400^\circ C$ , a no mínimo 93% da densidade teórica. Uma placa dessa série, com núcleo de 30%  $UO_2$ , foi submetida a 1098 ciclos no ensaio de ciclagem

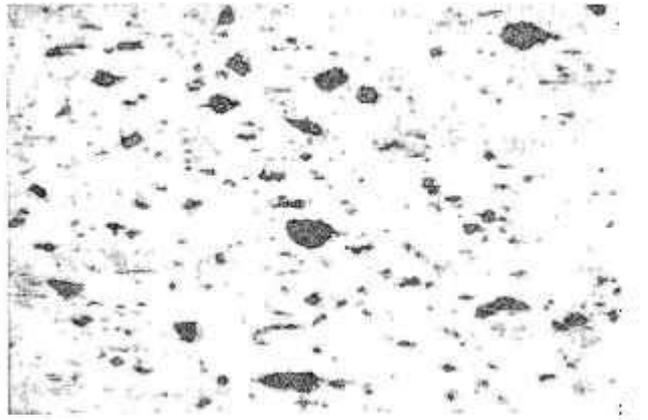


Fig. 6 — Microestrutura de seção transversal de núcleo de chapa contendo dispersão de 25%  $UO_2-75\% Al$ , depois de submetida a 1000 ciclos, e fabricada pelo processo de co-lingotagem. Notar a inexistência de reação entre os constituintes. 80 X.

térmica descrito, entre  $30$  e  $83^\circ C$ , sem que se pudesse distinguir qualquer início de reação entre os constituintes do núcleo pelo exame metalográfico das amostras cortadas.

Registra a literatura a dificuldade de se produzirem chapas perfeitas com dispersões de  $UO_2-Al$ . Waugh<sup>(46)</sup> mostrou que certos tipos de  $UO_2$  reagem rapidamente com alumínio a  $600^\circ C$ . Os autores acreditam que essa dificuldade possa ser contornada, efetuando-se a laminação a temperaturas mais baixas — o que é possível no processo de co-lingotagem — e empregando-se pó de  $UO_2$  de característicos adequados.

Visto como foi comprovado ser satisfatório o comportamento de  $UO_2-Al$  sob irradiação<sup>(47)</sup>, as perspectivas de emprego dessas dispersões em elementos combustíveis de chapa são muito promissoras, no confronto com  $U_3O_8-Al$ . Para o mesmo conteúdo de urânio, as dispersões  $UO_2-Al$  apresentam as seguintes vantagens:

- 1) a fração volumétrica da fase cerâmica é menor, o que melhora a plasticidade da dispersão e a ligação núcleo-revestimento;
- 2) é diminuída a possibilidade de reação durante a ciclagem térmica, em virtude da diminuição das áreas de reagentes em contacto; e
- 3) a condutibilidade térmica é melhorada, em virtude do maior valor para essa propriedade para  $UO_2$ <sup>(48)</sup> e maior proporção da matriz metálica presente.

Outras vantagens de natureza geral são:

- 1) uma vez fixado o teor limite de urânio na placa para que se possa laminar sem dificuldade, o que depende do máximo volume admissível na fase cerâmica, é claro que maior massa de material físsil pode ser colocada no elemento combustível com  $UO_2$ , dado o fato de que este é 30,5% mais denso que  $U_3O_8$ ; isto é importante principalmente no caso em que se tenha de empregar óxido de menor enriquecimento; e

- 2) há evidências de que as tendências de segregação são menos acentuadas, o que provavelmente resulta da maior resistência à fragmentação.

A necessidade de se dispor de melhores dados para a avaliação da qualidade da ligação núcleo-revestimento, e assim da intensidade desse caldeamento, conduziu ao desenvolvimento do ensaio já descrito de dobramento alternado. Inicialmente, o ensaio foi realizado em 41 chapas e mostrou que o número de ciclos a que resiste antes de observado o descascamento constitui uma boa medida da qualidade do caldeamento. Observou-se que as chapas que não resistiram ao ensaio de empolamento, não resistiram a mais que um dobramento, ao passo que chapas boas resistiram até 10. Conforme se deve esperar, o número de dobramentos a que uma chapa pode resistir aumenta com o aumento do teor de alumínio na dispersão.

Visando correlacionar a influência dos característicos dos pós, da pressão de compactação e das condições de laminação sobre a homogeneidade da dispersão depois de laminada a chapa e a qualidade do caldeamento, foi fabricada uma série de 60 chapas por co-lingotagem, com diferentes proporções de  $U_3O_8$  e de  $UO_2$  no núcleo. Algumas das principais conclusões obtidas foram:

- 1) podem ser obtidos núcleos de elevada densidade e que apresentam grande estabilidade química;
- 2) conseguiu-se homogeneidade do núcleo de forma a satisfazer requisitos estabelecidos para reatores de alto fluxo <sup>(40)</sup>; e
- 3) a qualidade da ligação, indicada pelos ensaios de empolamento e de dobramento alternado, mostrou-se excelente para as chapas contendo entre 25 e 35% de  $U_3O_8$  ou de  $UO_2$ ; as chapas produzidas e que continham entre 45 e 55% de fase cerâmica e que passaram no ensaio de empolamento, apresentaram ligação menos perfeita, quando o confronto é baseado nos resultados do ensaio de dobramento alternado.

Outros dados detalhados referentes ao comportamento dessas chapas são apresentados em outra contribuição a este Congresso <sup>(45)</sup>.

## 6. ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS COM PASTILHAS CERÂMICAS

Outro setor importante das atividades da Divisão tem sido o voltado aos trabalhos de pesquisa e desenvolvimento para a produção de pastilhas de  $UO_2$  e de  $UO_2$ - $ThO_2$  de elevada densidade..

Foram obtidas pastilhas de  $UO_2$  com 97,2% da densidade teórica, pela sinterização de pastilhas de óxido hiper-estequiométrico em atmosfera de argônio a 1400°C. Os característicos desses pós — produzidos na Divisão como se disse — foram intensamente estudados, utilizando-se os métodos de ensaios descritos. Os dados coligidos sistematicamente permitiram estabelecer boa correlação com o seu comportamento na sinterização.

Continuam a ser realizados extensos estudos sobre o comportamento de vários tipos de  $UO_2$  na sinterização em atmosfera de hidrogênio, sendo aquele óxido produzido por redução, a partir de diuranato de amônio precipitado em condições variáveis. Os resultados recentes obtidos mostraram que, mesmo os piores pós de  $UO_2$  do ponto de vista de sinterabilidade em atmosfera de argônio, podem atingir 92% da densidade teórica, quando sinterizados em hidrogênio a 1600°C durante apenas 2 h.

Produziram-se igualmente pastilhas de  $UO_2$ - $ThO_2$  ou de  $U_3O_8$ - $ThO_2$  sob diversas condições para a obtenção de peças de elevada densidade. As composições de  $U_3O_8$ - $ThO_2$  sinterizadas ao ar a 1400°C durante 3 h acusaram densidades até de 94,1% da densidade teórica. Exames ceramográficos desses materiais comprovaram terem se formado extensas zonas de solução sólida entre aqueles óxidos.

Os autores prevêm que o estado atual da pesquisa sobre cerâmica na Divisão atingiu nível que assegura deverem ser relativamente pequenas as dificuldades que possam surgir para a fabricação de pastilhas de  $UO_2$  para conjunto sub-crítico, que devam possuir cerca de 92% da densidade teórica. A experiência ganha, anteriormente <sup>(4)</sup>, demonstrou que o conhecimento acumulado na Divisão nas etapas de condicionamento, de pré-sinterização e de sinterização, permitem prever que aqueles resultados possam ser obtidos em escala de usina-pilôto. A pesquisa adicional será por isso mais voltada à sinterização em hidrogênio sob temperaturas elevadas e ao acabamento superficial das pastilhas.

## 7. USINA PILÓTO DE COMBUSTÍVEIS CERÂMICOS

Para assegurar o desenvolvimento da tecnologia de elementos combustíveis cerâmicos, está sendo implantada uma usina pilôto, ao lado das atuais instalações da Divisão, dotada de tôdas as facilidades necessárias. Seu projeto e construção, bem como o de quasi tôdas as suas unidades, resultaram da experiência acumulada no desenvolvimento de trabalhos anteriores, conforme se mostrou na introdução a esta contribuição.

Presentemente, encontra-se em fase de conclusão (em maio de 1971) o edifício que abrigará os equipamentos dessa usina, dotado de 1.100 m<sup>2</sup> de área construída, sem incluir a cabina externa para gases.

A maior parte do equipamento foi projetada e construída em São Paulo por firmas especializadas, com base na experiência anterior, utilizando também fornos de construção local por essas firmas. Entre as unidades encomendadas e já recebidas, destacam-se: forno de calcinação do diuranato de amônio, fabricado pela Combustol Ltda.,

dotado de carro para carregamento das bandejas de material resistente ao calor e à corrosão; forno de redução, também de fabricação Combustol Ltda., elétrico, de mufla de aço resistente ao calor, e dotado de dispositivo empurrador de velocidade variável; conjuntos de moinhos e de misturadores. Foram encomendados no exterior, já tendo igualmente sido recebidos, conjunto de prensas automáticas Stokes para pré-compactação, granulação e compactação final de pastilhas; e forno Harper, modelo MM-6428, com resistência de molibdênio, para sinterização a 1600-1850°C, contínuo, com botes de molibdênio de 140x140x50 mm. Estão sendo aguardados conjuntos de retíficas para pastilhas e novos equipamentos para ensaios de tubos de revestimento e para solda dos conjuntos montados, inclusive de feixe de elétrons.

Essa nova instalação constituirá unidade bastante flexível para prosseguimento dos desenvolvimentos da tecnologia de combustíveis cerâmicos e sua capacidade deverá atingir cerca de 300 kg/mês de pastilhas de  $UO_2$ .

## 8. LABORATÓRIO DE MATERIAIS ESPECIAIS E ENSAIOS

Outro setor no qual a Divisão de Metalurgia Nuclear irá expandir as suas atividades é o de materiais especiais — combustíveis de elevado enriquecimento, materiais irradiados e compostos tóxicos — através de nova instalação que permita o desenvolvimento de estudos tecnológicos, e que compreendem também determinados ensaios novos, ainda não realizados nas atuais instalações do Instituto de Energia Atômica. O projeto dessa unidade foi baseado em experiência anterior nesse setor de um dos autores<sup>(60, 61)</sup>.

O objetivo principal dessa nova unidade é a tecnologia de combustíveis nucleares reciclados para emprêgo em reatores térmicos. Dado o fato de o trabalho nas glove-boxes requerer considerável experiência dos técnicos, o treinamento de pessoal para essa natureza de trabalhos constituirá um dos importantes objetivos do laboratório.

No programa de materiais especiais ligado a urânio enriquecido, procurar-se-á o aperfeiçoamento de processos de fabricação de elementos combustíveis dentro dos melhores padrões de controle desses materiais.

Na seção destinada aos estudos de materiais irradiados contar-se-á com três células ditas "quentes", destinadas respectivamente a estudos de reprocessamento pirometalúrgico, à fabricação de componentes de alta atividade gama e à realização de ensaios. Pretende-se utilizar amplamente os recursos de micro-sonda e de microscopia eletrônica de varredura, para exames detalhados de homogeneidade e composição de elementos combustíveis e para determinação da textura e da morfologia dos poros.

## 9. CONCLUSÕES

1. Foi apresentado um retrospecto da contribuição da Divisão de Metalurgia Nuclear ao desenvolvimento do "know-how" nacional fabricação de elementos combustíveis. Os esforços feitos para balancear a inovação com a adaptação de processos foram desenvolvidos de forma a se procurar um progresso rápido nesse setor.

2. Atingiu, na Divisão, um estágio bastante adiantado a experiência acumulada na fabricação de elementos combustíveis de chapa para reatores de pesquisa, com núcleos de dispersão  $U_3O_8-Al$ ; os elementos fabricados podem satisfazer às especificações usuais.

3. O processo de co-lingotagem foi estudado em detalhe. As chapas produzidas por esse processo e contendo núcleos de dispersão de  $U_3O_8$  ou de  $UO_2$  com alumínio, comprovaram ter excelente caldeamento com o revestimento e boa homogeneidade no núcleo. A possibilidade de poderem as chapas ser laminadas a temperaturas muito mais baixas do que as empregadas no processo de moldura, abriu a possibilidade de se empregar  $UO_2$  na dispersão, em lugar de  $U_3O_8$ .

4. Os trabalhos de desenvolvimento sobre a produção de pastilhas de  $UO_2$  a partir de materiais nacionais, purificados no próprio Instituto e processados para os pós cerâmicos na Divisão, conduziram a processos eficientes de fabricação, inclusive no caso de soluções sólidas contendo  $ThO_2$ .

5. A conclusão, prevista para breve, de uma usina piloto para cerâmica nuclear e a construção futura de um laboratório para materiais especiais e ensaios, assegurarão a continuação e o progresso dos trabalhos que têm sido orientados para a fabricação de combustíveis para reatores de potência.

## BIBLIOGRAFIA

1. PEREIRA DA SILVA, P. S. C.; SOUZA SANTO, T. D. e FREITAS, C. T. — Contrôles dimensional de pastilhas de urânio para o reator Re-Suco, ABM-bol. ass. bras. met. 20:85 (1964) 759-770.
2. SOUZA SANTOS, T. D.; BIDWELL, R. M.; FREITAS, C. T.; HAYDT, H. M. e PEREIRA DA SILVA, P. S. C. — Estudo experimental das principais variáveis para a produção de pastilhas de  $UO_2$  para o reator sub-crítico Re-Suco. ABM-bol. ass. bras. met. 20 85 (1964) 771-784.
3. SOUZA SANTOS, T. D.; HAYDT, H. M.; FREITAS, C. T. — Fabricação dos elementos combustíveis de  $UO_2$  para o conjunto sub-crítico Re-Suco. Metalurgia-rev. ass. bras. met. 21 88 (1965) 217-222.
4. SOUZA SANTOS, T. D.; HAYDT, H. M.; FREITAS, C. T.; CAPOCCHI, J. D. T.; CINTRA, S. H. L. e PUCCINI, E. C. — Principais características metalúrgicas dos elementos combustíveis fabricados para o conjunto sub-crítico Re-Suco. Metalurgia-rev. ass. bras. met. 23 112 (1967) 175-190.

5. SOUZA SANTOS, T. D.; HAYDT, H. M. e FREITAS, C. T. — Development Studies for Argonaut Fuel Fabrication. Trans. Study Group Meeting on the Utilization of Research Reactors, 1 (1965) 279-297.
6. SOUZA SANTOS, T. D.; BIDWELL, R. M.; HAYDT, H. M. e FREITAS, C. T. — Nota preliminar sobre propriedades e estruturas de dispersões  $U_3O_8$ -Al. ABM.-bol. ass. bras. met. 20 84 (1964) 567-576.
7. SOUZA SANTOS, T. D.; HAYDT, H. M. e FREITAS, C. T. — Experimental Studies on the Fabrication of Thin Fuel Plates with  $U_3O_8$ -Al Cermets. Proc. Third Intern. Conf. Peac. Uses Atom. Energ. 10 (1965) 33-37.
8. SOUZA SANTOS, T. D.; HAYDT, H. M. e FREITAS, C. T. — Developments in Fuel Fabrication for Research Reactors in Brazil. Proc. Third Intern. Conf. Peac. Uses Atom. Energ. 10 (1965) 26-29.
9. SOUZA SANTOS, T. D.; HAYDT, H. M. e FREITAS, C. T. — Fabricação dos elementos combustíveis para o reator Argonauta do Instituto de Engenharia Nuclear. Metalurgia-rev. ass. bras. met. 21 90 (1965) 369-376.
10. SOUZA SANTOS, T. D.; HAYDT, H. M. e FREITAS, C. T. — Principais característicos metalúrgicos dos elementos combustíveis produzidos para o reator Argonauta do Instituto de Engenharia Nuclear. Metalurgia-rev. ass. bras. met. 21 97 (1965) 909-921.
11. SOUZA SANTOS, T. D.; HAYDT, H. M. e FREITAS, C. T. — Produção experimental de urânio e tório metálicos no Instituto de Energia Atômica. Metalurgia-rev. ass. bras. met. 21 87 (1965) 147-152.
12. FREITAS, C. T. — Redução do tetrafluoreto de urânio por magnésio. Estudo experimental da influência de algumas variáveis. Metalurgia-rev. ass. bras. met. 24 123 (1968) 131-138.
13. FREITAS, C. T.; CINTRA, S. H. L.; GENTILE, E. F. e CAPOCCHI, J. D. T. — Fusão e lingotagem de urânio sob vácuo em forno de laboratório. Metalurgia-rev. ass. bras. met. 24 125 (1968) 237-250.
14. MORAES, E. e CAPOCCHI, J. D. T. — Nota preliminar sobre o emprego de apizoados à base de MgO para revestimento de bombas de redução de  $UF_4$  por Mg. Metalurgia-rev. ass. bras. met. 25 145 (1969) 953-957.
15. CAPOCCHI, J. D. T.; GENTILE, E. F. e TRACANELLA, R. B. — Obtenção de ligas Al-Th e Al-Th-U por redução de  $ThO_2$  e de  $UO_2$  por alumínio líquido. Metalurgia-rev. ass. bras. met. 25 144 (1969) 831-842.
16. CAPOCCHI, J. D. T. — Estudo experimental de produção de tório metálico por redução direta do óxido de tório por metais líquidos. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, nov. (1970).
17. FREITAS, C. T.; HAYDT, H. M. e SOUZA SANTOS, T. D. — Nota preliminar sobre a fabricação de pastilhas de berilla, de tória e de soluções sólidas tória-urânio. ABM.-bol. ass. bras. met. 20 80 (1964) 557-566.
18. SOUZA SANTOS, T. D.; HAYDT, H. M.; FREITAS, C. T. CAPOCCHI, J. D. T. e PUCCINI, E. C. — Estudo experimental da produção de pastilhas de  $ThO_2$  e de  $ThO_2$ - $UO_2$ . Metalurgia-rev. ass. bras. met. 22 108 (1966) 883-888.
19. HAYDT, H. M.; CAPOCCHI, J. D. T.; MORAES, E.; GENTILE, E. F. — Sinterização de pastilhas de  $ThO_2$  e de soluções sólidas  $ThO_2$ - $UO_2$ . Metalurgia-rev. ass. bras. met. 26 157 (1970) 959-963.
20. HAYDT, H. M.; CAPOCCHI, J. D. T.; CINTRA, S. H. L. e GENTILE, E. F. — Nota preliminar sobre propriedades e estruturas de dispersões à base de tória. Metalurgia-rev. ass. bras. met. 25 135 (1969) 111-119.
21. HAYDT, H. M.; CINTRA, S. H. L.; CAPOCCHI, J. D. T.; ABRÃO, M. A. S. e BUENO, R. P. A. — Estudo sobre propriedades e estruturas de dispersões à base de tória. Metalurgia-rev. ass. bras. met. 26 147 (1970) 121-126.
22. SOUZA SANTOS, T. D.; HAYDT, H. M. e FREITAS, C. T. — Fabricação de fontes de neutrons constituídas por antimônio e berilla. Metalurgia-rev. ass. bras. met. 23 110 (1967) 25-30.
23. GENTILE, E. F. — Metalografia de ligas alumínio-urânio. Metalurgia-rev. ass. bras. met. 24 124 (1968) 187-192.
24. CINTRA, S. H. L.; GENTILE, E. F. e SOUZA SANTOS, T. D. — Um ensaio de alternância térmica para placas contendo dispersões. Metalurgia-rev. ass. bras. met. 26 150 (1970) 417-420.
25. BUENO, R. P. A.; PIMENTEL, C. A. e NISHIOKA, I. — Microscopia eletrônica de pós de  $UO_2$ . Metalurgia-rev. ass. bras. met. 27 162 (1971).
26. AMBROZIO, F. e GENTILE, E. F. — Observação metalográfica de urânio. Metalurgia-rev. ass. bras. met. 27 162 (1971).
27. GENTILE, E. F. — Estudo sobre a instabilidade dimensional do urânio metálico sujeito à alternância térmica. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, março (1971).
28. HAYDT, H. M. e CINTRA, S. H. L. — Nota preliminar sobre a fabricação de elementos combustíveis planos contendo núcleo de liga Al-U. Metalurgia-rev. ass. bras. met. 23 120 (1967) 955-960.
29. CINTRA, S. H. L.; GENTILE, E. F.; HAYDT, H. M. e CAPOCCHI, J. D. T. — Desenvolvimento de placas combustíveis contendo núcleo de liga Al-20% U e Al-20% U 0.8% Si. Metalurgia-rev. ass. bras. met. 24 131 (1968) 781-787.
30. IERVOLINO, J. R. e CINTRA, S. H. L. — Influência de ligas Al-Mg na obtenção de elementos combustíveis com núcleo de liga Al-U-Si. Metalurgia-rev. ass. bras. met. 27 158 (1971) 31-36.
31. SOUZA SANTOS, T. D. — Redução de  $U_3O_8$  em pó por alumínio líquido. Metalurgia-rev. ass. bras. met. 26 149 (1970) 283-289.
32. SOUZA SANTOS, T. D. — Tratamento pirometalúrgico de elementos combustíveis planos  $U_3O_8$ -Al. Metalurgia-rev. ass. bras. met. 25 142 (1969) 681-685.
33. SOUZA SANTOS, T. D.; HAYDT, H. M.; FREITAS, C. T.; GENTILE, E. F. e CINTRA, S. H. L. — Característicos de placas delgadas para elementos combustíveis contendo dispersões de  $U_3O_8$ -Al. Metalurgia-rev. ass. bras. met. 22 109 (1966) 935-940.
34. SOUZA SANTOS, T. D.; CAPOCCHI, J. D. T. e CINTRA, S. H. L. — Estudo experimental de fabricação de elementos combustíveis planos dotados de múltiplos cermets. Metalurgia-rev. ass. bras. met. 24 125 (1968) 295-300.
35. CAPOCCHI, J. D. T.; CINTRA, S. H. L. e GENTILE, E. F. — Estudo de fabricação de elementos combustíveis planos com núcleos de cermets 65%  $U_3O_8$ -35%-Al, revestidos com liga de alumínio. Metalurgia-rev. ass. bras. met. 24 133 (1968) 913-918.
36. CINTRA, S. H. L.; GENTILE, E. F.; NISHIOKA, I.; ABRÃO, M. A. S. e AMBROZIO, F. — Análise de variáveis do processo de fabricação de placas combustíveis com núcleos de dispersões Al- $U_3O_8$ . Metalurgia-rev. ass. bras. met. 26 146 (1970) 31-34.

37. GENTILE, E. F.; CINTRA, S. H. L. e TRACANELLA, R. B. — Estudo da reatividade de dispersões  $U_3O_8$ -Al. *Metalurgia-rev. ass. bras. met.* 26 149 (1970) 305-309.
38. HAYDT, H. M.; FREITAS, C. T. e CAPOCCHI, J. D. T. — Pastilhas de  $UO_2$  de elevada densidade. *Metalurgia-rev. ass. bras. met.* 24 123 (1968) 138-144.
39. NISHIOKA, I.; BUENO, R. A. P. e CAPOCCHI, J. D. T. — Nota preliminar sobre caracterização de  $UO_2$  para fabricação de elementos combustíveis. *Metalurgia-rev. ass. bras. met.* 25 143 (1970) 733-740.
40. NISHIOKA, I. — Influência da moagem nas características de sinterabilidade dos pós de  $UO_2$ . *Metalurgia-rev. ass. bras. met.* 26 156 (1970) 889-895.
41. HAYDT, H. M.; CAPOCCHI, J. D. T.; NISHIOKA, I.; BUENO, R. A. P.; CINTRA, S. H. L.; GENTILE, E. F. e SOUZA SANTOS T. D. — Sintering of Uranium Dioxide: Influence of the Characteristics of the Powders. Second Interamerican Conference on Materials Technology. México (1970) 203-212.
42. NISHIOKA, I. — Da caracterização dos pós de  $UO_2$  para sinterização. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, abril (1971).
43. TAYLOR, A. J.; CHERUBINI, J. H.; ROBBINS, J. M. e HAYDON, M. P. — Characterization of Spheroidal  $UO_2$  Particles and Studies of Fabrication Variables for Core B Fuel Plates of the Enrico Fermi Fast Breeder Reactor. ORNL-3645 (1964) 13 e 49.
44. BERGUA, H. FRIDDLE, R.; DIAZ, J. e BAIRD, J. — Fabrication of the ISNSE Fuel Element for Low Power Research Reactor. Nuclear Fuel Elements, Reinhold Publishing, New York (1959) 184-192.
45. FREITAS, C. T.; SOUZA SANTOS, T. D.; GENTILE, E. F. e AMBROZIO F., F. — Emprégo de co-lingotagem na fabricação de elementos combustíveis planos (trabalho apresentado ao XXVI Congresso Anual da Associação Brasileira de Metais, Rio de Janeiro, junho/julho de 1971).
46. WAUGH, R. C. — The reaction and growth of uranium dioxide-aluminum fuel plates and compacts. Rep. ORNL-2701 (1959).
47. JOHNSON, R. J. — «Application of cermets to nuclear devices». Cermets, Reinhold New York (1960) 192.
48. KINGERY, W. D.; ROSS, A. M. e BELLE, J. — "Thermal conductivity" Uranium dioxide: properties and nuclear applications USAEC Naval Reactors, Division of Reactor Development (1961) 187.
49. MC CLUNG, R. W. — Development of non-destructive testing techniques for the high flux isotope reactor fuel element. Rep. ORNL-3780 (1965) 10.
50. FREITAS, C. T.; AYER, J. E. e PETKUS, E. J. — Compactação a quente de  $UO_2$ - $PuO_2$ . *Metalurgia-rev. ass. bras. met.* 26 148 (1970) 183-189.
51. FREITAS, C. T. — Hot pressing actinide oxides (M. Sc. Thesis) University of Illinois, January (1970).

## DISCUSSÃO

J. TÁVORA VEADO <sup>(1)</sup> — Desejariamos ter informações mais específicas sobre o problema de fabricação de pastilhas de óxido de urânio, porquanto a Divisão do IEA deverá fabricar o combustível para o conjunto CAPITU.

T. D. DE SOUZA SANTOS <sup>(2)</sup> — Para o programa do conjunto CAPITU, deveremos fabricar cerca de 7 t de pastilhas para esse reator. As pastilhas terão cerca de 14 mm de diâmetro e utilização de  $UO_2$  produzido no País e purificado no IEA, na Divisão de Engenharia Química.

A limitação de tempo de apresentação da contribuição não nos permitiu mostrar a disposição de todas as unidades no edifício que se encontra em término de construção, dotado de 1.080 m<sup>2</sup> de área construída. Essa nova instalação constituirá uma unidade bastante flexível para os desenvolvimentos ulteriores de fabricação de elementos combustíveis. Quase todas as principais unidades já foram recebidas, tanto as importadas como as de fabricação local.

Além do programa citado pelo Prof. Juarez, a Divisão deverá abordar, em fins de 1972, outro conjunto de elementos combustíveis para um reator sub-crítico que presentemente se encontra em estudos.

JORGE E. KITTL <sup>(3)</sup> — Quantas pessoas trabalham no processo?

T. D. DE SOUZA SANTOS — Até fins do ano passado esse grupo compreendia 15 engenheiros metalurgistas. Atualmente estamos reduzidos a apenas 5, devendo ser substancialmente aumentado até o fim do ano corrente.

J. E. KITTL — A experiência geral de trabalho desenvolvido pelo grupo dirigido pelo Prof. Tharcisio Souza Santos significa uma grande contribuição de que se poderá atingir com grupo bastante reduzido de pessoas.

PAULO GOMES DE PAULA LEITE <sup>(4)</sup> — Gostaria de saber quais os ensaios térmicos que estão sendo realizados no IEA. No curso que desenvolvi na ABM examinei os ensaios térmicos apenas do ponto de vista teórico. Tenho informações de que em empresas de aviação (aviões a jato) ensaios térmicos permitem determinar com alguma precisão a qualidade da ligação de materiais diferentes.

E. F. GENTILE <sup>(5)</sup> — Estamos presentemente estudando a aquisição de aparelhamento que permite por absorção de raios infra-vermelhos e que é capaz de captar variações na placa. Trata-se de desenvolvimento recente, nos Estados Unidos. Também participamos do ponto de vista trazido pelo Prof. Paula Leite, de que o ensaio térmico constituirá, possivelmente, uma base importante para esclarecer a questão do caldeamento entre o núcleo e o revestimento.

P. G. DE PAULA LEITE — Agradeço a informação e constato que efetivamente esse ensaio poderá ter grande importância. Nasceu de experiências realizadas por médicos para verificar diferenças de temperaturas e agora é utilizado por engenheiros para avaliar as intensidades de ligações.

(1) Membro da ABM; Engenheiro Civil e Nuclear e Doutor; Chefe da Seção de Metalurgia Física do Instituto de Pesquisas Radioativas; Belo Horizonte, MG.

(2) Co-autor da CT.

(3) Engenheiro Químico e Doutor; Chefe do Departamento de Metalurgia, Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires, República Argentina.

(4) Membro da ABM. Engenheiro Civil; Professor na Escola de Engenharia da UFRJ e Coordenador do Plano de Formação de Pessoal do Ministério de Minas e Energia; Rio de Janeiro, GB.

(5) Membro da ABM. Divisão de Metalurgia Nuclear, Instituto de Energia Atômica; São Paulo, Brasil.

(6) Co-autor da CT.

### ABSTRACT

The main activities of the Instituto de Energia Atomica's Metallurgical Division are presently concentrated on the development of fuel element technology for high-flux reactors and for future power reactors with UO<sub>2</sub> pellets.

The plastic behavior of fuel assemblies during hot-rolling of welded picture frame sets and of cast clad ingots has been studied, much attention having been given to the cast clad ingots of special design. The cast cladding affords excellent bonding, as evaluated by the resistance of the finished plates in a reverse bending test.

The results on the sinterability of non-stoichiometric UO<sub>2</sub> powders produced for the utilization in UO<sub>2</sub> pellet fabrication are discussed. Further developments on a new pilot plant for ceramic studies and for a special materials laboratory, comprising one section devoted to plutonium studies, are also presented.

### RÉSUMÉ

Ils sont en cours, a la Division de Métallurgie Nucléaire de l'Instituto de Energia Atomica, des expériences qui visent la fabrication d'éléments combustibles destinés aux reacteurs. Pour ces expériences, des procédés technologiques de métallurgie et de céramique nucléaires sont appliqués aux conditions existantes par utilisation de matériaux nationaux.

Les auteurs présentent les publications antérieures, ils décrivent les améliorations introduites dans la fabrication des éléments combustibles de plaque, notamment par la technique d'encadrement et de co-lingotage, et destinés aux reacteurs de recherche et à haut flux.

Les auteurs examinent aussi les résultats obtenus avec la fabrication de pastilles de combustible de UO<sub>2</sub>, une technologie liée à la fabrication des éléments combustibles pour les reacteurs de puissance, et ils décrivent la nouvelle usine pilote de céramique nucléaire, en cours de construction, ainsi que le laboratoire de matériaux spéciaux et pour des essais, actuellement dans son projet final.

### RESUMEN

El Instituto de Energia Atomica en su División de Metalurgia Nuclear está desarrollando estudios experimentales visando la fabricación de elementos combustibles para reactores, utilizando materiales nacionales y adaptando a las condiciones vigentes los procesos tecnológicos de la metalurgia y cerámica nucleares.

En esta contribución, los autores pasan en revista los trabajos desarrollados, objeto de numerosas publicaciones anteriores, describen los perfeccionamientos introducidos en la fabricación de elementos combustibles de chapa para reactores de investigación y de alto flujo, notadamente por las técnicas de moldura y de co-lingotaje, examinan los principales resultados obtenidos en la fabricación de pastillas de UO<sub>2</sub> de alta densidad, tecnología relacionada con la fabricación de elementos combustibles para reactores de potencia, y describen, con los principales datos, la nueva usina piloto de cerámica nuclear, en construcción, y el laboratorio de materiales especiales y ensayos, actualmente en fase de proyecto final.