



**FABRICAÇÃO DOS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS COM  
PASTILHAS DE  $U_3O_8$  PARA O CONJUNTO SUB CRÍTICO  
DO INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**Therézio D de Souza Santos Helton Motta Naydt  
Erberto Francisco Gentile Francisco Ambrozio Filho  
Ney Freitas de Queiroz e Nestor Fogaça Filho**

**PUBLICAÇÃO IEA 440  
CMN 82**

**OUTUBRO/1976**

**FABRICAÇÃO DOS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS COM  
PASTILHAS DE  $U_3O_8$  PARA O CONJUNTO SUB CRÍTICO  
DO INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

Tharciso D. de Souza Santos, Helton Motta Haydt  
Erberto Francisco Gentile, Francisco Ambrozio Filho  
Ney Frantas de Quadros e Nestor Fogaça Filho

**COORDENADORIA DE METALURGIA NUCLEAR  
(CMN)**

**INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA  
SÃO PAULO - BRASIL**

#### CONSELHO DELIBERATIVO

Eng<sup>o</sup> Hélio Modesto da Costa  
Eng<sup>o</sup> Ivano Humbert Marchesi  
Prof. Admar Carvelli  
Prof. Sérgio Mascarenhas de Oliveira  
Dr. Klaus Reinach  
Dr. Roberto D. Utra Vaz

#### SUPERINTENDENTE

Prof. Dr. Rômulo Ribeiro Pironi

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA  
Caixa Postal 11 049 (Pinheiros)  
Cidade Universitária - Armando de Salles Oliveira  
SÃO PAULO - BRASIL

# FABRICAÇÃO DOS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS COM PASTILHAS DE $U_3O_8$ PARA O CONJUNTO SUB CRÍTICO DO INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA <sup>(1)</sup>

Tharciso D. de Souza Santos<sup>(2)</sup> Helton Motta Haydt<sup>(3)</sup>  
Erberto Francisco Gentile<sup>(4)</sup> Francisco Ambrozio Filho<sup>(5)</sup>  
Ney Freitas da Quadros<sup>(6)</sup> e Nestor Fogaça Filho<sup>(7)</sup>

## RESUMO

Esta contribuição descreve a fabricação totalmente realizada nos laboratórios da Coordenadoria de Metalurgia Nuclear (CMN) do Instituto de Energia Atômica (IEA) de um conjunto de 360 elementos combustíveis com pastilhas de  $U_3O_8$  natural de 33 mm de diâmetro encerradas em tubo de liga de alumínio e destinados a um conjunto sub-crítico para pesquisas do Instituto Militar de Engenharia. O  $U_3O_8$  foi fabricado na CMN mediante calcinação de 2.900,4 kg de diuranato de amônio de pureza nuclear e unidade de calcinação tratou cargas de 252 kg de diuranato de amônio em ciclos de 42 horas de operação. As pastilhas de  $U_3O_8$  foram produzidas em prensas hidráulicas de fabricação nacional em matrizes de 40,1 mm de diâmetro. Foram fabricadas 8.000 pastilhas com densidade média de  $7,30 \pm 0,11 \text{ g/cm}^3$  as quais passaram por rigoroso controle de suas características a massa total de pastilhas carregadas nos elementos combustíveis foi de 2.282,8 kg. A operação de sinterização foi realizada em fornos elétricos de fabricação nacional e as operações nas últimas semanas atingiram o nível médio diário de 75 kg/dia. Os tubos bem como as barras de alumínio destinados à fabricação por usinagem das peças terminais foram especialmente fabricados com base em especificações fornecidas. Todas as soldas foram efetuadas pelo processo TIG com auxílio de uma unidade Cyber Tig Hobart em uma máquina projetada e construída para este programa nas oficinas da própria CMN. Foram executados extensos controles de todas as operações e realizados os ensaios correspondentes. Por fim os elementos combustíveis foram submetidos a tratamento de proteção superficial por oxidação por via química.

## 1 - INTRODUÇÃO

A Coordenadoria de Metalurgia Nuclear (anteriormente Departamento e antes Divisão) do Instituto de Energia Atômica recebeu a solicitação de fabricar para o Instituto Militar de Engenharia Rio de Janeiro RJ os elementos combustíveis necessários ao seu conjunto sub-crítico denominado SUBLIME destinado a pesquisas relacionadas com as atividades de ensino de engenharia nuclear. Esse conjunto foi projetado nessa instituição e lá construído. Os elementos combustíveis são essencialmente

(1) Trabalho apresentado no XXX Congresso Anual da Associação Brasileira de Metais, Rio de Janeiro RJ 29 de junho a 4 de julho de 1975. Publicado em Metalurgia - Rev. Ass. Bras. de Materiais vol. 31 nº 217 dezembro de 1975.

(2) Membro Honorário ABM. Professor Catedrático Departamento de Engenharia Metalúrgica Escola Politécnica USP. Coordenador Geral Coordenadoria de Metalurgia Nuclear Instituto de Energia Atômica São Paulo SP.

(3) Membro ABM. Doutor em Engenharia (Engenharia Metalúrgica) Coordenador de Área Coordenadoria de Metalurgia Nuclear Instituto de Energia Atômica São Paulo SP.

(4) Membro ABM. Mestre em Engenharia (Engenharia Metalúrgica) Supervisor de Agrupamento Coordenadoria de Metalurgia Nuclear Instituto de Energia Atômica São Paulo SP.

(5) Membro ABM. Mestre em Engenharia (Engenharia Metalúrgica) Chefe de Equipe Coordenadoria de Metalurgia Nuclear Instituto de Energia Atômica São Paulo SP.

(6) Membro ABM. Mestre em Ciências (Metalurgia) Pesquisador Sênior Coordenadoria de Metalurgia Nuclear Instituto de Energia Atômica São Paulo SP.

(7) Membro ABM. Engenheiro Metalurgista Pesquisador Júnior Coordenadoria de Metalurgia Nuclear Instituto de Energia Atômica São Paulo SP.

tubos cilíndricos de alumínio encerrando uma coluna de 980 mm de altura de pastilhas de  $U_3O_8$  natural, de 33 mm de diâmetro. Os tubos são fechados inferiormente por peças que terminam por um tubo, também de mesma liga de alumínio, de 25 mm de diâmetro, e que se inserem nos orifícios coaxiais de duas placas, também de alumínio para assegurar a verticalidade dos mesmos. Os elementos combustíveis ocupam um reticulado hexagonal, os centros distando dos contíguos por valor constante.

Anteriormente, a Coordenadoria de Metalurgia Nuclear havia fabricado em conjunto de 266 elementos combustíveis, também de  $UO_2$  natural, em pastilhas apenas pré-sinterizadas de 40,2 mm de diâmetro. Os principais dados referentes a esses elementos combustíveis para o conjunto sub-crítico 'RE-SUCO' foram descritos em 4 contribuições técnicas apresentadas em Congresso desta Associação<sup>(3,4 e 8)</sup>. Esse conjunto sub-crítico para pesquisas foi posto em funcionamento pela primeira vez em 7 de Janeiro de 1966 e foi posteriormente transferido, por doação, à Universidade Federal de Pernambuco, em Recife, onde continua a ser utilizado com grande frequência, em estudos experimentais de física de reatores.

Com base nessa experiência acumulada e em trabalhos que vêm sendo desenvolvidos pelos autores nos últimos anos em outras linhas de atividade, notadamente em dilatometria de sinterização de óxidos de urânio, foi sugerido a aquela instituição, em lugar de pastilhas de  $UO_2$  solução que foi empregada no "RE-SUCO" conforme dito acima se empregarem pastilhas de menor diâmetro, mas de  $U_3O_8$  sinterizadas a  $7,30 \text{ g/cm}^3$  de densidade.

Convém recordar que são muito escassos na literatura especializada os dados referentes à sinterização de  $U_3O_8$ . É bem sabido que este óxido não poderia ser empregado em reatores críticos que atinjam temperaturas elevadas. Não sendo esse o caso de um conjunto sub-crítico, existem inegáveis vantagens em se adotar a solução recomendada pelos autores, com o que, pouco depois de estabelecido o primeiro contacto concordou o Instituto Militar de Engenharia após haver examinado de forma completa todos os ângulos novos que ofereceria a solução.

Esta contribuição descreve as principais etapas da fabricação dos 380 elementos combustíveis encomendados à Coordenadoria de Metalurgia Nuclear. O início das atividades de planejamento das operações de fabricação foi em Julho de 1973, e a entrega de todo o carregamento de elementos combustíveis ao Instituto Militar de Engenharia foi efetuada a 20 de Junho de 1974.

## 2 - ESPECIFICAÇÕES DOS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS

As especificações dos elementos combustíveis para o conjunto sub-crítico do Instituto Militar de Engenharia eram as seguintes:

numero de elementos combustíveis	380
massa total das pastilhas de $U_3O_8$	2050 kg
diâmetro nominal das pastilhas	33,0 mm
densidade geométrica das pastilhas $U_3O_8$ , min	7,0 $\text{g/cm}^3$
altura total do empilhamento das pastilhas no elemento combustível	980 mm
altura total do elemento combustível	1303 mm

A especificação da liga de alumínio a ser empregada nos tubos e barras (para peças terminais) que constituem o revestimento, foi a mesma adotada no 'RE-SUCO'<sup>(1)</sup>, e reproduzida a seguir (Tabela I).

**Tabela I**  
**Especificação da Liga Al 1100<sup>(6)</sup>**

elemento	% max
Cu	0,2
Si + Fe	1,0
Mn	0,05
Zn	0,10
outros (soma)	0,15

### 3 – DESCRIÇÃO DA FABRICAÇÃO

#### 3.1 – Sequencia das operações

O diagrama de sequência de operações foi estabelecido com todos os seus pormenores depois de completados todos os estudos experimentais que foram necessários para vencer inúmeras dificuldades encontradas e depois de ter ficado comprovada a reprodutibilidade dos resultados obtidos, notadamente quanto a estrutura e densidade das pastilhas sinterizadas de  $U_3O_8$ .

Igualmente especial atenção teve de ser dedicada aos problemas de solda das duas peças terminais, superior e inferior, o que foi feito pelo processo TIG utilizando máquina de grande versatilidade quanto as variáveis a serem adotadas a operação exigiu a construção de uma máquina para a execução da solda feita nas oficinas da CMN. Os prolongados estudos experimentais realizados permitiram comprovar a excelência das soldas realizadas e a reprodutibilidade dos resultados.

A figura 1 mostra de forma resumida a sequencia das principais operações de fabricação dos elementos combustíveis e os controles exercidos.

#### 3.2 – Origem do diuranato de amônio

Para a fabricação de 2.282,4 kg de  $U_3O_8$  em pastilhas sinterizadas, foram necessários 2.900,4 kg de diuranato de amônio, cedido pela Comissão Nacional de Energia Nuclear ao Instituto Militar de Engenharia. Essa partida era constituída de diversos lotes de sais de características variáveis quanto as condições de precipitação, processados na Coordenadoria de Engenharia Química do IEA pelo processo de purificação lá desenvolvido a partir de uranato de sódio não nuclear produzido este pela anterior Administração da Produção da Monazita (anteriormente Orquima SA) pelo tratamento de concentrados de monazita do Espírito Santo.

Em virtude de aquela unidade do IEA não ter podido ainda obter meios para concluir a secção destinada à precipitação e filtração contínuas do diuranato de amônio, o sal produzido apresentava variações de características as quais influenciam a sinterabilidade dos compactados produzidos.

As dificuldades para a obtenção de pastilhas sinterizadas com maior uniformidade de densidade foram contornadas em parte pela seleção dos lotes mais favoráveis pela homogeneização do diuranato de amônio e do  $U_3O_8$  resultante e pelos estritos controles de pré-compactação exercidos antes de serem produzidas as pastilhas para sinterização final.

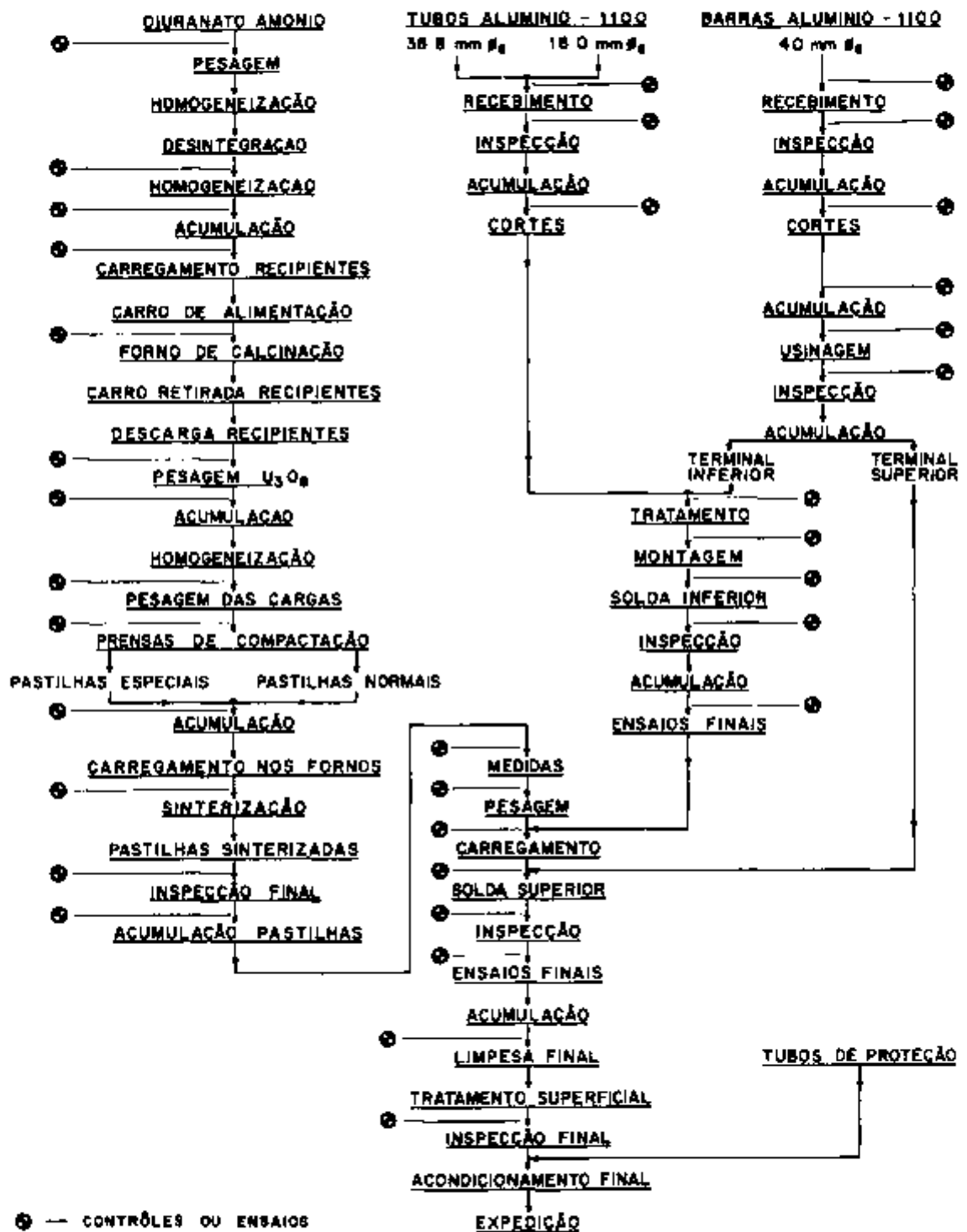


Figura 1 — Diagrama de seqüência das principais operações de fabricação dos elementos combustíveis com pastilhas de  $U_3O_8$

### 3.3 – Calcinação

Todas as partidas de diuranato de amônio foram previamente amostradas para determinação da umidade contida o valor médio encontrado em 2.900,4 kg foi de 1,2 %.

O diuranato de amônio recebido apresentava aglomerados de dimensões e consistência variáveis. Foi, por isso, previamente desintegrado em unidade granuladora em tela de aço inoxidável de 20 malhas por polegada. O material desintegrado foi posteriormente homogeneizado antes de serem efetuadas as pesagens das cargas para os recipientes do forno de calcinação.

A calcinação foi realizada em um forno de mufla aquecido por combustão de óleo diesel a temperatura de 750°C durante 9 horas. A carga de diuranato de amônio é distribuída em bandejas superpostas de aço 28% Cr e 15% Ni a altura média da camada em cada bandeja sendo de 4 cm. As bandejas empilhadas são introduzidas no forno por meio de um carro com dispositivo de levantamento e abaixamento o mesmo carro permite assim a retirada das bandejas uma vez concluída a operação. O ciclo total de todas as operações é de 42 horas inclusive o tempo de resfriamento do  $U_3O_8$  ainda nas bandejas. A operação evidenciou muito boa reprodutibilidade de características do  $U_3O_8$  apesar das flutuações de propriedades do diuranato de amônio resultantes como se disse de ainda não dispor o IEA de unidade contínua para precipitação e filtração.

Inicialmente as cargas eram de 50 e 60 kg de diuranato empregando-se menor número de bandejas. Depois de ajustadas as variáveis da operação passou-se rapidamente a utilizar a capacidade do forno cada operação correspondendo a uma carga total de 252 kg de diuranato de amônio nessas condições a capacidade do forno e que foi projetado e construído, em São Paulo pela Combustol Indústria e Comércio Ltda. e de cerca de 100 kg de diuranato de amônio por dia de operação.

Foram realizadas ao todo 30 operações de calcinação 2 para ajustamento de variáveis e 28 para a produção do  $U_3O_8$  necessário a fabricação das pastilhas. A massa total de diuranato de amônio tratado foi de 3.064,3 kg sendo 2.900,4 kg correspondentes a produção de 2.314,5 kg de  $U_3O_8$  destinado as pastilhas.

Os controles executados em cada operação foram massas de entrada e de saída, tempos e temperaturas durante a operação, densidade solta, batida a limite da carga e do  $U_3O_8$  produzido e análise granulométrica do  $U_3O_8$ .

### 3.4 – Homogeneização do $U_3O_8$

As diversas partidas de  $U_3O_8$  produzidas foram continuamente homogeneizadas em misturador rotativo de grande capacidade para facilitar os trabalhos e controles subsequentes. Comprovou-se inicialmente que essa homogeneização era muito importante. Todas as precauções foram tomadas para evitar perdas nas operações de manipulação do diuranato de amônio e no  $U_3O_8$  produzido. As perdas totais de massa registradas referidas ao conteúdo de  $U_3O_8$  em todo o desenvolvimento do programa de fabricação por diferença entre material contido entrado e expedido em elementos combustíveis foram de apenas 8,0 kg.

A fabricação da grande série de pastilhas de  $U_3O_8$  de cerca de 250 g cada uma exigiu perfeito e continuado controle dos característicos dos pós e dos procedimentos de cada operação. A importância de manutenção dos característicos dentro das faixas fixadas no programa de fabricação resultava dos problemas que decorriam da grande massa e das dimensões das pastilhas e da impossibilidade de recorrer ao uso de qualquer aglomerante para a compactação.

### 3.5 — Compactação

Até meados de outubro de 1973 todas as operações foram realizadas em uma única prensa hidráulica de 40 t de esforço máximo existente nos laboratórios da Coordenadoria. Para ampliar a capacidade de produção de pastilhas recorreu-se ao Departamento de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica que cedeu por empréstimo prensa semelhante porém de maior capacidade (60 t de esforço máximo). Com essas duas unidades em funcionamento a produção média diária de pastilhas de excelentes características para a sinterização atingiu 40 kg/dia.

As técnicas desenvolvidas para o condicionamento das cargas de  $U_3O_8$  e para a produção e acumulação das pastilhas antes da sinterização asseguraram não somente muito boa reprodutibilidade de resultados, como ainda índices muito baixos de pastilhas defeituosas. Os custos de produção foram também bastante baixos em consequência dos procedimentos adotados e dos controles efetuados e também dos elevados rendimentos registrados em todas as operações subsequentes de fabricação.

Das 9 000 pastilhas destinadas ao carregamento nos 360 elementos combustíveis 8 640 eram normais isto é com diâmetros de  $40,2 \pm 0,1$  mm e altura de  $47,0 \pm 2,0$  mm no estado compactado e 360, ditas especiais no sentido que deveriam ter altura correspondente ao espaço faltante entre a soma das alturas das 24 pastilhas standard e a altura do empilhamento de  $U_3O_8$  dado de projeto e que era de 980 mm. Foram assim fabricadas essas 360 pastilhas especiais cada uma correspondendo a um determinado elemento combustível. A sistematização adotada permitiu que essa etapa fosse feita com grande simplicidade, e em tempo muito reduzido e sem que se registrassem pastilhas não-aceitas.

Nas operações de compactação procurou-se obter compactados com características geométricas e físicas bem definidas os quais foram estabelecidos com base em ensaios prévios de sinterabilidade dos pós de  $U_3O_8$  produzidos.

Os controles exercidos sistematicamente foram a) natureza geométrica e b) natureza física.

a) controles de natureza geométrica — As dimensões indicadas (diâmetro  $40,2 \pm 0,1$  mm e altura  $47,0 \pm 2,0$  mm) foram determinadas em 2% do número de todas as pastilhas produzidas cada dia e em lotes correspondentes a 350 pastilhas. Os resultados dos levantamentos desses índices mostraram que os diâmetros mantiveram-se constantes em 40,2 mm durante todo o programa de fabricação e que as alturas foram de  $47,6 \pm 0,4$  mm de desvio médio padrão.

A visualização dos resultados do controle efetuado pode ser feita através dos gráficos de média e do intervalo de variação de parâmetros tais como densidade, altura e diâmetro das pastilhas. A figura 2 mostra um desses gráficos onde é apresentado o controle da densidade média dos lotes de pastilhas a verde. As linhas mais externas representam os limites em que devem ser tomadas providências na fabricação para que não se percam os lotes produzidos. Esses limites foram calculados para 99,8% de certeza. As outras duas linhas mais internas são chamadas "linhas de advertência" sendo calculadas para 95% de certeza.<sup>(2)</sup>

Figura 3 apresenta um gráfico de controle do intervalo de variação de densidade entre os elementos da amostra. A construção do mesmo obedece a linha geral acima explicada.

b) controles de natureza física — Os ensaios de sinterabilidade de pós de  $U_3O_8$  indicaram a necessidade de a densidade aparente geométrica dos compactados ser de  $4,2 \pm 0,3$  g/cm<sup>3</sup> a fim de nas condições que foram fixadas para o ciclo de sinterização se atingir a faixa de valores de densidade especificada para a densidade das pastilhas. A amostragem foi feita também em 2% das pastilhas de cada lote e os resultados obtidos em toda a série de produção mostrou valor médio da densidade geométrica de  $4,28 \pm 0,04$  g/cm<sup>3</sup> de desvio médio padrão.

Como se vê, foi excelente a reprodutibilidade obtida quanto aos característicos das pastilhas no estado compactado o que naturalmente corresponde a um requisito importante para a operação subsequente de sinterização.

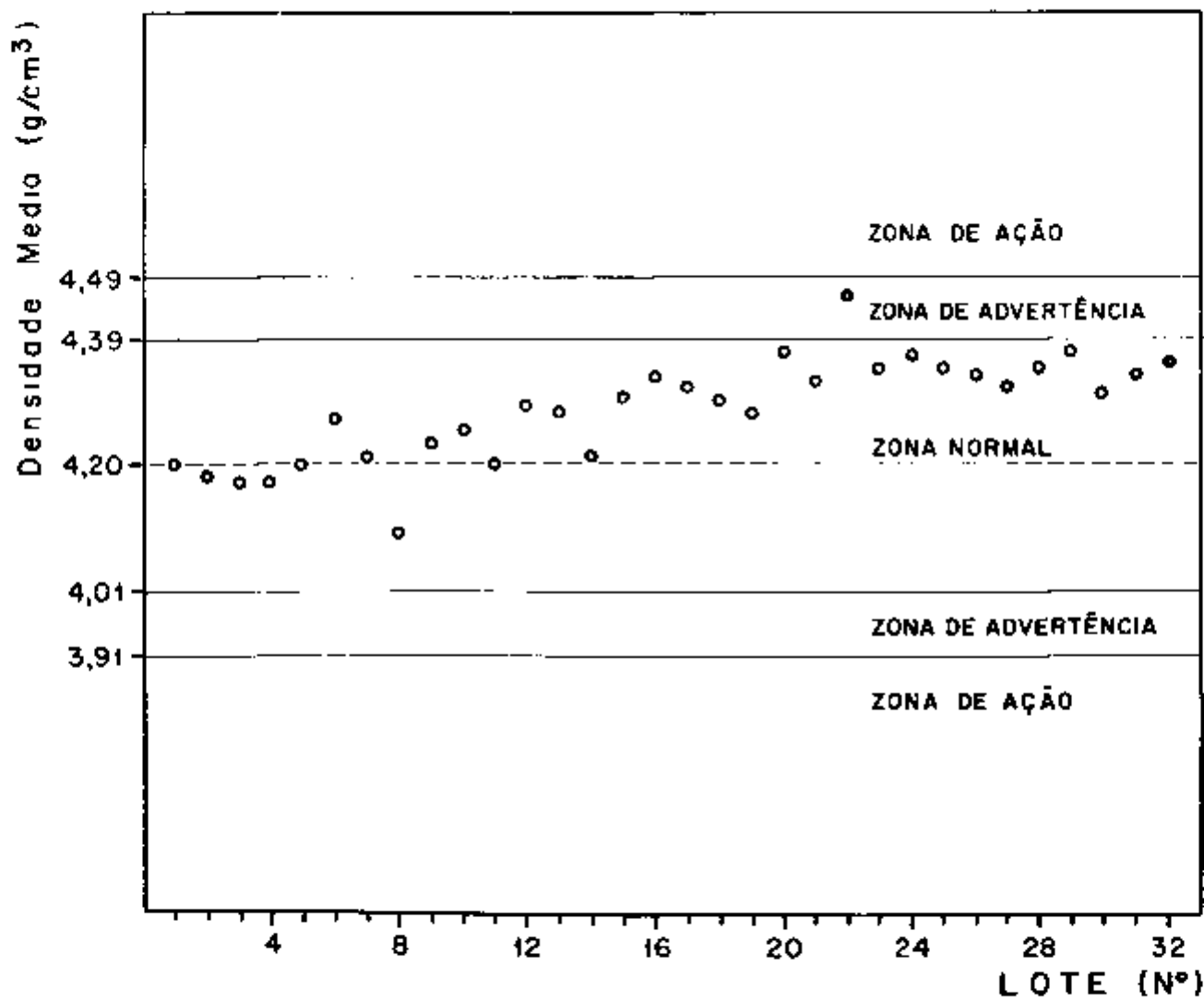


Figura 2 — Representação de gráfico de controle de densidade média dos lotes de fabricação das pastilhas de  $U_3O_8$  no estado compactado

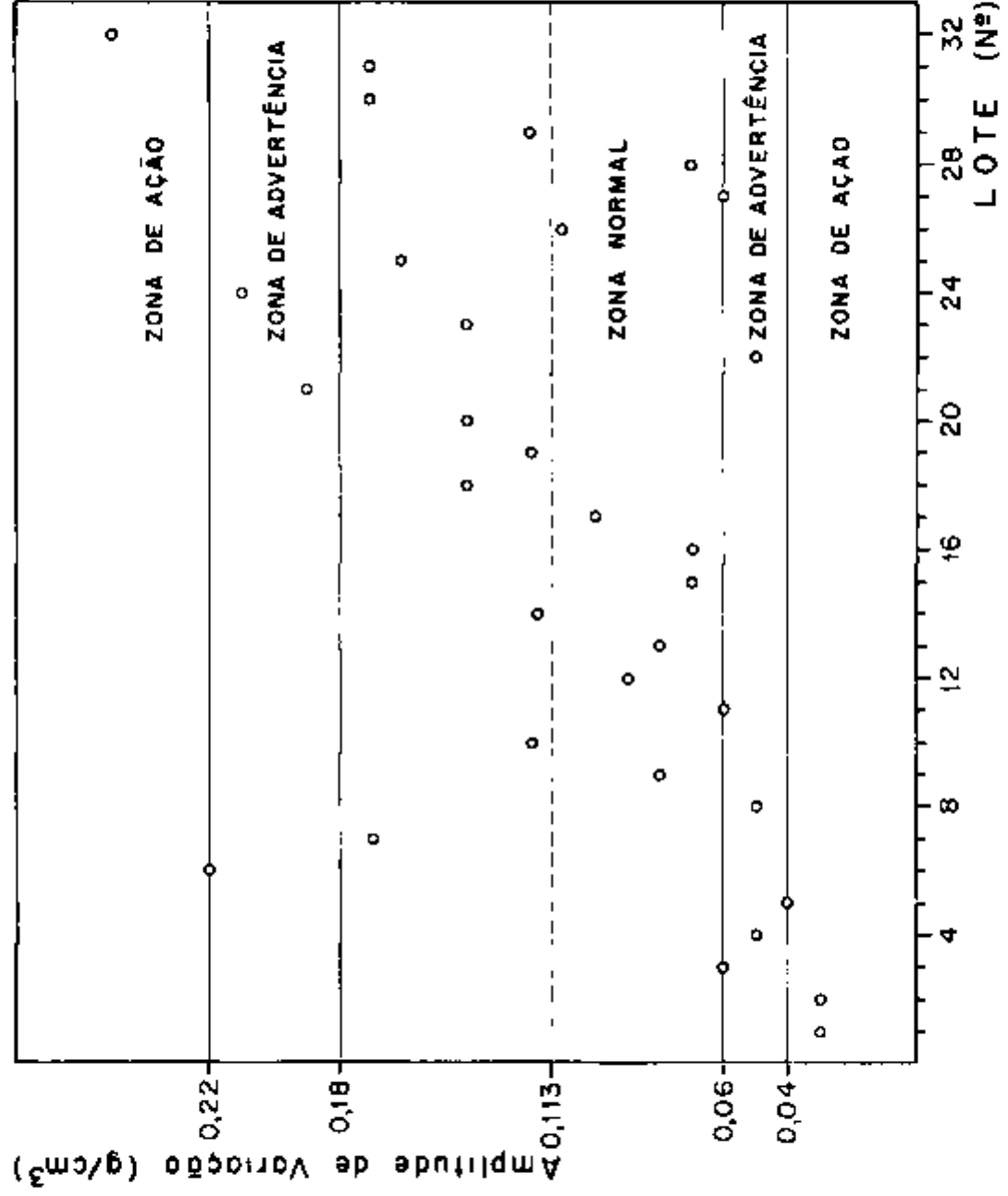


Figura 3 -- Representação de gráfico de controle da variação de densidade dos elementos dos lotes da pastilhas de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> no estado compactado

### 3.6 – Sinterização

A sinterização das pastilhas foi efetuada em três fornos elétricos de resistência de Kanthal cujas capacidades de carga eram, respectivamente de 100, 200 e 300 pastilhas. A não ser na fase inicial de acerto das variáveis o rendimento das pastilhas dentro das especificações e sem defeitos superficiais foi próximo de 99,2%. Nas últimas semanas conseguiram-se médias semanais de 375 kg/semana de pastilhas.

O funcionamento dos fornos foi plenamente satisfatório tendo sido muito reduzidos os reparos de resistências elétricas ou de hastes de proteção de pares termo-elétricos.

Os principais controlos executados foram:

a) controlos de dimensões das pastilhas – Esses controlos foram efetuados seguindo as normas estabelecidas pela Coordenadoria de Metalurgia Nuclear em amostras correspondentes a 5% do número de pastilhas de cada lote procedente de cada um dos fornos empregados. Os valores médios para as 8.640 pastilhas normais carregadas nos elementos combustíveis foram altura média  $39,8 \pm 0,4$  mm e diâmetro médio  $33,7 \pm 0,2$  mm (média e desvio padrão médio).

b) controle das densidades das pastilhas – Os controlos foram também exercidos sobre as pastilhas que correspondiam a 5% da massa de cada um dos lotes procedentes de cada um dos fornos de sinterização. O valor obtido para a média de toda a produção foi  $7,30 \pm 0,11$  g/cm<sup>3</sup> (média e desvio padrão médio).

c) controle de defeitos superficiais (lascas, trincas e orifícios na superfície) – O controle de defeitos superficiais foi executado sobre cada uma das pastilhas necessárias ao carregamento abrangendo assim ao todo 9.000 pastilhas. Foram rejeitadas as pastilhas que apresentavam trincas que abrangessem mais de 80% da superfície, ou lascas de mais de 1 mm de largura ou ainda orifícios na superfície de mais de 0,5 mm de diâmetro. Em toda a produção foram rejeitadas em virtude de defeitos superficiais 265 pastilhas.

Todas as pastilhas foram numeradas e foi organizado um sistema especial para a acumulação das pastilhas em caixas de madeira de modo a não só identificá-las em relação aos lotes produzidos, como ainda facilitar subsequentemente a operação de carregamento nos tubos de liga de alumínio.

A Tabela II apresenta um resumo dos característicos da população de pastilhas de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> fabricadas para os elementos combustíveis SUBLIME.

**Tabela II**  
Características das pastilhas produzidas para o SUBLIME

parametro	pastilhas no	pastilhas
	estado compactado	sinterizadas
massa (g)	259.868 ± 0,175	258.728 ± 0,187
altura (mm)	47,6 ± 0,4	39,8 ± 0,4
diâmetro (mm)	40,2 ± 0,1	33,7 ± 0,2
densidade (g/cm <sup>3</sup> )	4,29 ± 0,04	7,30 ± 0,11

A figura 4 mostra a micrografia de uma seção transversal de uma pastilha de  $U_3O_8$  após sinterização, na qual pode se observar a granulação extremamente fina e homogênea da microestrutura. Ressalta-se também a distribuição de poros que ficaram em contornos de grão em quase sua totalidade.

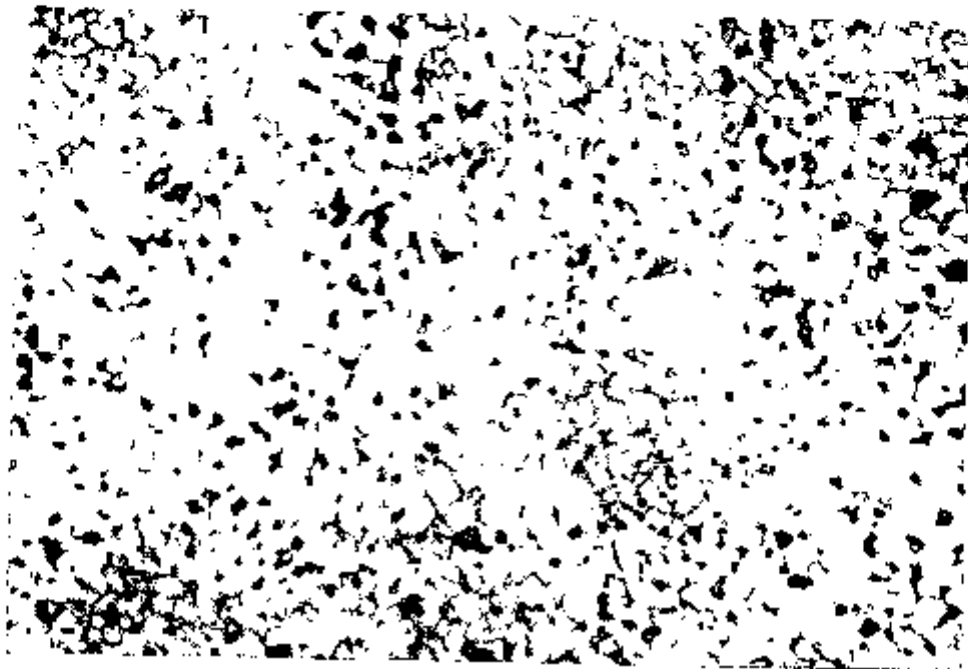


Figura 4 — Micrografia de seção transversal de uma pastilha de  $U_3O_8$  onde pode ser observada a granulação fina e a distribuição de poros em contorno de grão. Ataque  $H_2SO_4 + 10\% H_2O_2$ . Aumento 630 x. Ampliação 3,5 x.

### 3.7 — Tubos e barras de alumínio 1100

Os tubos e barras de liga 1100 de alumínio de composição correspondente a indicada na Tabela 1 foram encomendados a Companhia Brasileira de Alumínio que, com grande presteza executou toda a encomenda entregando-a antes de decorrido o prazo previsto. Os materiais corresponderam as especificações em todos os seus característicos. Foram tomadas precauções especiais quanto a proteção da superfície dos tubos durante a viagem da usina em Alumínio município de São Roque São Paulo até os laboratórios da Coordenadoria de Metalurgia Nuclear. O resultado dessas medidas foi que as perdas verificadas por riscos e marcas superficiais dos segmentos dos tubos empregados foram extremamente reduzidas: menos de 4% dos comprimentos utilizados.

O conjunto do elemento combustível em sua parte de liga de alumínio é formado por 5 peças distintas todas obtidas por usinagem, realizada nas oficinas da Coordenadoria de Metalurgia Nuclear. Preferiu-se realizar todas operações dentro da CMN para que se pudessem garantir com rapidez, os estritos limites dimensionais necessários ao fechamento feito subsequentemente pelo processo TIG.

Os controles dimensionais das peças que com as pastilhas iriam compor os elementos combustíveis exigiram a construção de calibras e dispositivos especiais para montagem ou para controle todos feitos também nas oficinas da Coordenadoria de Metalurgia Nuclear.

Ao todo foram realizadas 7200 operações de usinagem.

### 3.8 – Solda da parte terminal inferior do elemento combustível

Antes da montagem da parte terminal inferior do tubo de liga de alumínio foram efetuados nos tubos os exames finais quanto a eventual ovalização quanto a defeitos superficiais e quanto a eventuais rebarbas.

As operações de solda foram efetuadas pelo processo TIG em atmosfera de argônio em máquina especialmente construída na Coordenadoria de Metalurgia Nuclear e utilizando uma máquina de soldar Cybar Tig Hobart dotada de todos os recursos necessários inclusive programação para subida da corrente, pulsação e descida pouco antes de ser interrompida a corrente de solda. O ajustamento dos controles assegura penetração uniforme da solda sob elevadas velocidades de soldagem e boa reprodutibilidade dos resultados. De certa forma cada ciclo pulsado é um programa completo de solda com forma determinada da oscilação com os controles de corrente máxima e mínima e com ajustamento dos tempos em que tais correntes são aplicadas. Esse arranjo mostrou-se muito conveniente na realização de grande número de soldas (720 ao todo) unindo tubos de parede muito delgada com peças de maior massa e garantindo controle metalúrgico plenamente satisfatório.

O argônio empregado na linha de produção foi o de tipo comercial para solda produzido pela Oxigênio do Brasil SA.

Os ajustamentos iniciais da máquina construída na CMN e da unidade de solda Cybar Tig requereram tempo considerável não só para garantir a execução de cordões de solda perfeitos como ainda para treinar o pessoal que se ocupou dessas operações. Diversos ajustamentos foram feitos também na máquina que girava o conjunto do tubo com a peça terminal durante a solda sob velocidade variável conforme o estágio de formação do cordão de solda.

Esses parâmetros puderam ser otimizados previamente com o auxílio de técnicas metalográficas. A figura 5 apresenta uma macrografia de um corte transversal de um cordão de solda entre a extremidade do tubo e o terminal do elemento.



Figura 5 — Macrografia de seção transversal de um cordão de solda efetuado entre o tubo e terminal inferior do elemento. Ataque HF a 1%. Aumento 30 x

Inicialmente foram realizados ensaios de estanqueidade de dobramento e ainda exames macro e micrográficos sobre segmentos de tubos com o objetivo de conhecer os característicos das zonas soldadas. Os exames macrográficos foram de importância na fixação da largura da zona do cordão. De

outro lado as variáveis de solda e de velocidade de rotação é que influenciaram a maior ou menor penetração da zona fundida o que, por sua vez, determinava o resultado do ensaio de dobramento

### 3.9 – Ensaio de estanqueidade dos tubos com terminal inferior soldado

Cada um dos tubos contendo o terminal inferior soldado como descrito no item precedente foi submetido à inspeção visual quanto a eventuais defeitos discerníveis a olho nu e em seguida a ensaio de estanqueidade, por meio de insuflação de ar comprimido a superfície total do tubo sendo continuamente recoberta por solução de sabão líquido

### 3.10 – Carregamento das pastilhas nos tubos

A operação de carregamento das pastilhas de  $U_3O_8$  nos tubos foi realizada segundo programa especialmente preparado pela Coordenadoria de Metalurgia Nuclear de modo a permitir estrito controle das massas de  $U_3O_8$  em cada um dos 360 elementos combustíveis e de modo a facilitar a fabricação da pastilha "especial terminal, a qual, uma vez carregada deveria garantir que a altura total da coluna do empilhamento de pastilhas correspondia ao especificado, isto é, fosse de  $980 \pm 1$  mm de comprimento

Para isso, em cada elemento combustível eram anotadas as pastilhas de  $U_3O_8$  que compunham o empilhamento e feita sua pesagem total, por grupos de pastilhas, em balanças Mettler de 2 kg de massa total, com precisão de 1 g Ao mesmo tempo, era determinado o "complemento de altura" comprimento que deveria apresentar a 25ª pastilha sempre fração do comprimento das pastilhas normais Nessas condições para cada um dos elementos combustíveis conhecia-se com precisão qual a altura que deveria ter a "pastilha especial correspondente

A figura 6 constitui uma reprodução de uma dessas fichas de controle referente a um dentre os 360 elementos combustíveis fabricados

As pastilhas especiais foram produzidas depois que se dispunham dos dados a respeito da altura, e assim da massa, necessária para completar a coluna de 980 mm de altura das pastilhas de  $U_3O_8$  Para facilidade, os compactados assim produzidos tinham o mesmo número de identificação do elemento combustível ao qual se destinavam A identificação dos elementos combustíveis foi feita em dois locais distintos por meio de marca por punção, de modo a em qualquer tempo, identificar perfeitamente todas as pastilhas que contém

### 3.11 – Solda da parte terminal superior do elemento combustível

A mesma máquina construída pela Coordenadoria de Metalurgia Nuclear já mencionada anteriormente para a solda da parte terminal inferior foi utilizada na solda da parte superior

Como sabido esse solda oferece dificuldades muito maiores do que a primeira, da vez que o tubo já está carregado com as pastilhas, cuja massa total média de  $U_3O_8$  é de 6,34 kg

Foram realizados novos ensaios de estanqueidade por dispositivo especial construído também na Coordenadoria de Metalurgia Nuclear, seguidos de inspeção de eventuais defeitos no cordão de solda, sob lupe Em virtude de defeitos encontrados 18 elementos combustíveis tiveram de ser repetidos, substituindo-se os tubos de revestimento, para isso foram os mesmos cortados acima da última pastilha e a carga de pastilhas transferida para outros tubos com os terminais inferiores já soldados e ensaiados

Com o objetivo de manter a carga de pastilhas sob ligeira compressão dentro do tubo foi, antes de colocada a peça terminal superior, inserido um disco de borracha, o qual, em média, tinha massa de 31 g

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA  
 COORDENADORIA DE METALURGIA NUCLEAR  
 ELEMENTO COMBUSTÍVEL DMN - IME - 48

PASTILHAS  $U_3O_8$

1	48	8	1 126	15	1 826	22	2.295
2	186	9	1 240	16	1 942	23	4 570
3	477	10	1 360	17	6 426	24	4 458
4	584	11	4 813	18	1 593		776 8
5	763	12	2 073	19	6 314		
6	883	13	1 469	20	6 627		
7	1 002	14	1 703	21	2 179	25	
	<u>1 786,8</u>		<u>1 811,0</u>		<u>1 810 8</u>		<u>6 185 4</u>
							<u>1 17,0</u>
						total	<u>6 302,4</u>

Complemento altura 61 4 mm

massa calculada g

ALUMINIO

1 A	182,9
2 B	3 1
4 C	651 0
6 D	150 1
7 E	97 4
8 F	—

1 084,5 massa total Al

BORRACHA

33 calços	3 1
5 O ring	—
	<u>3,1</u>

massa total

MASSA TOTAL ELEMENTO COMBUSTIVEL

massa $U_3O_8$	6 302 4	g
massa Al	1 084,5	g
borracha	<u>3,1</u>	g
	<u>7.390,0</u>	g

Datas	massa $U_3O_8$	altura 117 0 especial
	aluminio	
14/10	verificação final	
$U_3O_8$ altura	aluminio	borracha
aprovação final 23/11/73		final
		inspeção 21/01/74

Figura 6 — Reprodução de uma das fichas de controle de carregamento com pastilhas de  $U_3O_8$  de um elemento combustível

3 12 — Dados médios referentes aos elementos combustíveis

A tabela III reúne os principais dados referentes aos 360 elementos combustíveis fabricados e aos seus característicos médios

3 13 — Acumulação dos elementos combustíveis que sofreram a inspeção final

Para evitar quaisquer danos nos elementos combustíveis antes de serem os mesmos submetidos ao tratamento de proteção contra corrosão por oxidação química, com esse de cromato foram os mesmos inseridos em tubos de papelão resistente especialmente fabricados para esse fim e com

diâmetro interno pouco superior ao diâmetro dos elementos combustíveis de 39 mm

A área ocupada pelos 360 elementos combustíveis encerrados nesses tubos de papelão, e dispostos lado a lado, era de 21,60 m<sup>2</sup>

**Tabela III**  
Principais Características dos Elementos Combustíveis  
Fabricados para o Conjunto Sub-Crítico SUBLIME

característico	unidade	valor
número total de elementos combustíveis		360
massa total de pastilhas de U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	kg	2 282,8
massa total de alumínio 1100	kg	390,4
massa total de caixos de borracha	kg	1 1
massa total dos 360 elementos combustíveis	kg	2 674 3
massa total de tubo de alumínio correspondente à coluna de 980 mm de altura ocupada pelas pastilhas (média)	kg	
relação massa Al/massa U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> na coluna de pastilhas de 980 mm de altura		0,65 0,1026
altura total do elemento combustível	mm	1 337
diâmetro do elemento combustível	mm	39
número total de pastilhas		9 000
número de pastilhas standard		8 640
número de pastilhas especiais		360
altura do empilhamento de pastilhas no elemento combustível	mm	980
altura total do empilhamento de todos os elementos combustíveis (parte de pastilhas)	m	361
densidade média das pastilhas	g/cm <sup>3</sup>	7 30
número de pastilhas em cada elemento combustível		26
massa média de pastilhas de U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> em cada elemento combustível	kg	6 34

### 3 14 - Tratamento de proteção superficial contra corrosão, por oxidação química

Como os elementos combustíveis do conjunto sub-crítico terão água como moderador, é conveniente proteger contra a corrosão todas as partes estruturais em liga de alumínio, por meio de oxidação provocada por cromato de potássio. Habitualmente essa proteção não seria necessária de vez que a água do conjunto sub-crítico deve ser desmineralizada e mantida sob estrito controle quanto às concentrações de determinados cations e anions para isso contará a unidade a exemplo do que foi feito no conjunto sub-crítico RE-SUCO (8) com um dispositivo de troca iônica por meio de resinas.

Os sais utilizados nesse tratamento foram gentilmente ofertados pela Companhia Imperial de Industrias Químicas São Paulo

As operações de tratamento superficial foram efetuadas no decurso de 3 semanas de trabalho. Todos os controlos químicos necessários foram eficientemente realizados pela Coordenadora de Engenharia Química do IEA.

O aparelhamento necessário foi montado pelo pessoal da Coordenadora de Metalurgia Nuclear. A disposição adotada permitiu realizar todas as operações dentro de cuidadoso controle das variáveis. Em virtude de defeitos apresentados e que foram constatados na inspeção visual de cada um dos elementos combustíveis tiveram de sofrer novo tratamento 13 elementos combustíveis. Os defeitos em questão correspondiam a falta de uniformidade na coloração amarela-palha característica o que podia ser atribuído ou a desengraxamento incompleto ou a insuficiência de decapagem prévia feita em solução de soda cáustica, a quente.

### 3.15 - Inspeção final dos elementos combustíveis

Logo que concluída a operação de oxidação química para a proteção adicional contra a corrosão aquosa, eram os elementos combustíveis submetidos um a um a cuidadosa inspeção visual, a fim de observar eventuais defeitos superficiais que tivessem escapado da última inspeção ou defeitos que decorressem da operação de tratamento superficial inclusive de manipulação.

Os elementos combustíveis eram em seguida enrolados em papel encerado e introduzidos nos tubos de papelão espesso para proteção. Esses tubos eram então acondicionados em caixas de madeira especialmente projetadas pela CMN as quais continham cada uma 8 elementos combustíveis. As caixas foram projetadas e executadas de forma a garantir que na sua manipulação, transporte e abertura, nenhum dano pudessem sofrer os elementos combustíveis. Cada uma das caixas continha a indicação numérica dos elementos combustíveis nela colocados.

A figura 7 constitui uma vista dos elementos combustíveis prontos depois de feita a última inspeção e antes de serem introduzidos nos tubos de papelão previamente envoltos em papel encerado. A figura 8 mostra outra vista tomada desses elementos combustíveis e uma das caixas para seu acondicionamento.

### 3.16 - Entrega dos elementos combustíveis

Todo o carregamento de 360 elementos combustíveis fabricados encerrados em 45 caixas de 8 elementos cada uma foi entregue a representante do Instituto Militar de Engenharia no dia 20 de junho de 1974. O transporte foi efetuado em caminhão e graças aos cuidados tomados não só no acondicionamento e encaixotamento como no transporte puderam ser os mesmos descarregados no destino sem que houvesse sido constatado qualquer dano.

## 4 - CONCLUSÃO

Foram apresentados todos os dados principais referentes ao extenso trabalho desenvolvido correspondente a fabricação de 360 elementos combustíveis com pastilhas de  $U_3O_8$  natural destinado ao conjunto sub-crítico projetado pelo Instituto Militar de Engenharia.

Conforme foi salientado o trabalho realizado constituiu apreciável acréscimo de experiência para a Coordenadora de Metalurgia Nuclear. Para sua efetivação foram estudados e estabelecidos numerosos novos procedimentos e controlos que asseguraram os elevados rendimentos registrados.

É de se realçar, por fim serem muito limitados na literatura técnica especializada os dados referentes a pastilhas de  $U_3O_8$ . Sob esse ponto de vista, o trabalho desenvolvido constitui uma contribuição a essa tecnologia devendo no futuro continuar a ser desenvolvida através de estudos mais pormenorizados sobre muitas das variáveis importantes do processo.

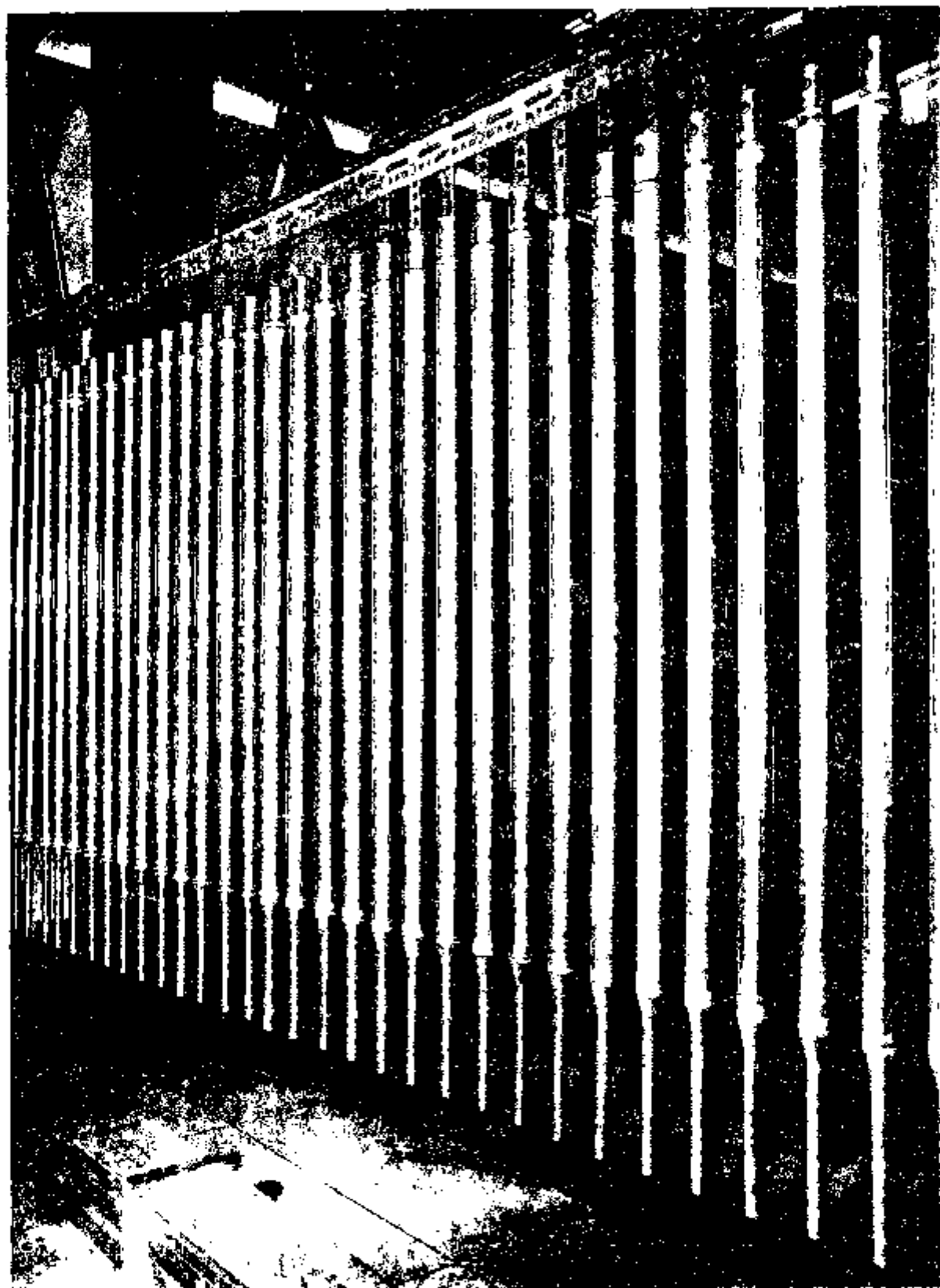
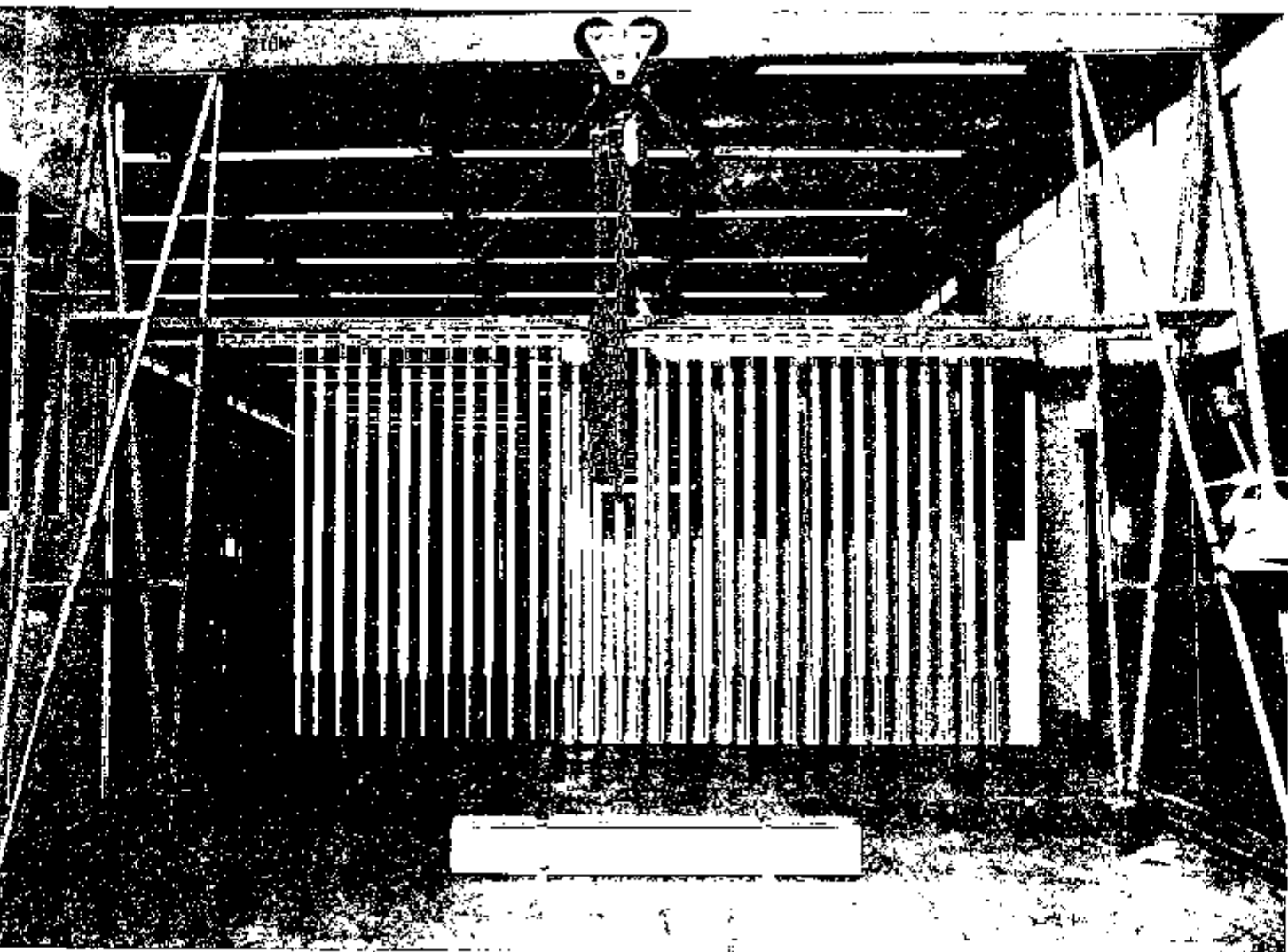


Figura 7 — Fotografia de alguns elementos combustíveis prontos após inspeção final posterior ao tratamento de oxidação química para aumento de resistência a corrosão



• 8 - Outra vista de conjunto de elementos combustíveis prontos, vendo-se uma das caixas utilizadas para seu acondicionamento

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ter sido realizado se não tivessem contado os autores com valiosa e dedicada cooperação de numerosas entidades e colaboradores. Destacam por isso a cooperação recebida da Combustol Industria e Comércio Ltda na pessoa de seu Presidente Eng<sup>o</sup> Paulo Lobo Peçanha da Companhia Brasileira de Alumínio na pessoa de seu Presidente Eng<sup>o</sup> Antonio Ermírio de Moraes da Companhia Imperial de Industrias Químicas pela cessão gratuita de todos os sais necessários ao tratamento de proteção e a Coordenadoria de Engenharia Química na pessoa do Coordenador Geral Dr. Alcídio Abrão, e da Química Sra. Ludmila Federgrun que realizou pessoalmente grande numero das análises necessárias.

Os colaboradores técnicos e auxiliares da Coordenadoria de Metalurgia Nuclear tiveram papel de grande importancia na realização deste trabalho em todas as suas fases. Destacam inicialmente a colaboração recebida dos supervisores de grupos, Srs. Arioswaldo Azevedo Domingos de Oliveira, Ronaldo de Menezes, Waldemar Corvello da Silva, Rubens Cima Pezzó e Sra. Rosa Maria Carbone que atualmente não mais faz parte da Coordenadoria. Registram, por fim, com satisfação a colaboração recebida de todos os demais técnicos e auxiliares da Coordenadoria de Metalurgia Nuclear na realização das operações descritas neste trabalho. Sras. Gláucia Maria Jorge Ribeiro, Luzinete Pereira Barbosa e Florinda Vieira, e Srs. Aparecido Ferreira, Durval de Jesus Romão, João Clemente Ferré, Jorge Marcelino da Silva, José Luiz Tenório da Silva, Nelson Gomes, Raimundo Cerqueira Nunes e Sebastião Caetano de Oliveira.

## ABSTRACT

The paper describes the complete fabrication of 360 fuel elements with natural  $U_3O_8$  pellets of 33.4 mm diameter. They will be used in a subcritical assembly designed and built by Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ. The  $U_3O_8$  utilized was produced in the laboratories by calcining ammonium diuranate, total amount treated being 2,800.4 kg. The charge to the batch type muffle calcining furnace was 252 kg and the total operations cycle was 90 hours. The  $U_3O_8$  pellets were pressed in locally built hydraulic presses with fully heat treated steel dies. 9,000  $U_3O_8$  sintered pellets of  $7.12 \pm 0.15 \text{ g/cm}^3$  density were produced and the total mass of pellets loaded into the aluminum tubes was 2,282.8 kg. Sintering was done in electric furnaces and the average production daily rate was 75 kg/day. The aluminum alloy tubes and bars required for fabricating the end parts were specially fabricated under rigid specifications by a Brazilian company. The welds of the end caps were performed by the TIG process under argon utilizing a Cyber Tig Hobart unit assembled in a machine which was specially built for that purpose. Extensive testing and controls were exerted during all the fabrication steps. Finally the fuel rods were treated by a chromium salt process to improve their corrosion resistance in the reactor deionized water.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 BUSH, S. H. Aluminum and its alloys. In TIPTON JUNIOR, C. R. ed. *Reactor handbook v. 1 Materials*. 2 ed. New York: Interscience, 1960. p. 483.
- 2 LOURENÇO FILHO, R. C. B. Controle de variáveis. In \_\_\_\_\_ *Controle estatístico de qualidade*. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1964.
- 3 SILVA, P. S. C. P. et alii. *Controle dimensional de pastilhas de urânio para o reator RE-SUCO*. São Paulo: Instituto de Energia Atômica, dez. 1964. (IEA-81).
- 4 SOUZA SANTOS, T. D. et alii. *Estudo das principais variáveis para o programa de pastilhas de  $UO_2$  para o reator sub-crítico RE-SUCO*. São Paulo: Instituto de Energia Atômica, dez. 1964. (IEA-82).
- 5 \_\_\_\_\_ et alii. *Fabricação dos elementos combustíveis para o arranjo sub-crítico RE-SUCO*. São Paulo: Instituto de Energia Atômica, mar. 1965. (IEA-92).