



**PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS METALÚRGICAS DOS
ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS FABRICADOS PARA O CON-
JUNTO SUBCRÍTICO "RE-SUCO"**

*THARCÍSIO D. DE SOUZA SANTOS, HELITON M. HAYDT, CLAUER
TRENCH DE FREITAS, JOSÉ DEODORO TRANI CAPOCCHI, SEBAS-
TIAO HERMANO LEITE CINTRA, ERBERTO FRANCISCO GENTILE,
ERNESTO COUTINHO PUCCINI*

PUBLICAÇÃO IEA N.º 143

Junho — 1967

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

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICOS METALÚRGICOS DOS ELEMENTOS

COMBUSTÍVEIS FABRICADOS PARA O CONJUNTO

SUBCRÍTICO "RE-SUCO"

Tharcísio D. de Souza Santos

Heliton M. Haydt

Clauer Trench de Freitas

José Deodoro Trani Capocchi

Sebastião Hermano Leite Cintra

Erberto Francisco Gentile

Ernesto Coutinho Puccini

Divisão de Metalurgia Nuclear

Instituto de Energia Atômica

São Paulo - Brasil

Publicação IEA nº 143

Junho - 1967

Comissão Nacional de Energia Nuclear

Presidente: Prof. Uriel da Costa Ribeiro

Universidade de São Paulo

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

Instituto de Energia Atômica

Diretor: Prof. Rômulo Ribeiro Pieroni

Conselho Técnico-Científico do IEA

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

Divisões Didático-Científicas

Divisão de Física Nuclear -

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

Divisão de Radioquímica -

Chefe: Prof. Dr. Fausto Walter de Lima

Divisão de Radiobiologia -

Chefe: Prof. Dr. Rômulo Ribeiro Pieroni

Divisão de Metalurgia Nuclear -

Chefe: Prof. Dr. Tharcísio Dany de Souza Santos

Divisão de Engenharia Química -

Chefe: Lic. Alcídio Abrão

Divisão de Engenharia Nuclear -

Chefe: Eng^o Pedro Bento de Camargo

Divisão de Operação e Manutenção de Reatores -

Chefe: Eng^o Azor Camargo Penteado Filho

Divisão de Física de Reatores -

Chefe: Prof. Dr. Paulo Saraiva de Toledo

Divisão de Ensino e Formação -

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICOS METALÚRGICOS DOS ELEMENTOS

COMBUSTÍVEIS FABRICADOS PARA O CONJUNTO

SUBCRÍTICO "RE-SUCO"

Tharcísio D. de Souza Santos

Heliton M. Haydt

Clauer Trench de Freitas

José Deodoro Trani Capocchi

Sebastião Hermano Leite Cintra

Erberto Francisco Gentile

Ernesto Coutinho Puccini

RESUMEN

El conjunto subcrítico "RE-SUCO" (Reactor Subcrítico de Óxido) fué proyectado y construido en el Instituto de Energía Atómica, con excepción de la coraza y del dispositivo de movimiento de los contadores, que fueron proporcionados y construidos por la Willys-Overland del Brasil S.A., teniendo la división de Metalurgia Nuclear el encargo de toda la fabricación de los elementos combustibles, constituidos por pilas de pastillas de UO_2 , a partir de sal de uranio de pureza nuclear.

La carga prevista para un valor de K_{ef} de 0,755 fué concluida el 19 de noviembre de 1965 y comprende en total 266 elementos combustibles, de los cuales 258 son normales y 8 especiales, con orificio para el paso del haz de neutrones del acelerador Van der Graaff. Cada elemento combustible es constituido por pilas de pastillas de UO_2 de densidad media de $6,86 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$ y teniendo una altura media de $93,00 \pm 0,09 \text{ cm}$. La carga total es constituida de 6,888 pastillas normales y 261 especiales, con masa total de $2.146,5 \pm 0,2 \text{ Kg}$. de UO_2 . La altura total de las columnas de pastillas es de $246,34 \pm 0,01 \text{ m}$. y la masa total de U contenida es de $1.891,2 \pm 0,2 \text{ Kg}$. Las pastillas son encerradas en tubos de aluminio 1100 de 44,3 mm de diámetro externo y los elementos combustibles tienen piezas de cierre superior é inferior, que además aseguran la perfecta verticalidad del reactor; la masa total de

aluminio de los elementos combustibles es de $340,5 \pm 0,2$ kg.

Con esta contribución en la cual se fijan todos los datos finales de fabricación y de control de toda la carga referida, describen los autores en detalle las siguientes etapas del proceso de fabricación de los elementos combustibles: 1 - Calcinación del diuranato de amonio; 2 - Reducción de $U_{38}O_{10}$ a UO_2 ; 3 - Acondicionamiento de polvo de UO_2 ; 4 - Preparación de las cargas para hacerlas compactas; 5 - Compresión de las pastillas; 6 - Pre-sinterización de las pastillas; 7 - Preparación e inspección de los tubos y piezas de aluminio; 8 - Preparación e inspección de los tubos para los elementos especiales; 9 - Carga de los elementos combustibles y su cierre; 10 - Tratamiento final de los elementos combustibles.

RÉSUMÉ

L'ensemble sous-critique "RE-SUCO" (Réacteur sous-critique d'oxyde) a été projeté et construit à l'Institut de Energia Atômica, à l'exception de la cuve et de la plateforme et du dispositif du mouvement des compteurs qui ont été offerts et construits par la Willys-Overland do Brasil S.A., la Division de Metallurgie Nucléaire se chargeant de toute la fabrication des éléments combustibles formés par l'empilement de pastilles de UO_2 , à partir du sel d'uranium de pureté nucléaire.

La charge prévue pour une valeur de K_{ef} de 0,775 fut terminée le 19 novembre ... 1965 et comprend 266 éléments combustibles, desquels 258 sont normaux et 8 spéciaux, avec un orifice pour le passage d'un faisceau de neutrons d'un accélérateur Van der Graaff. Chaque élément combustible est formé d'un empilement de pastilles de UO_2 de densité moyenne de $6,86 \pm 0,04$ g/cm³ et de hauteur moyenne de $93,00 \pm 0,09$ cm. La charge totale est constituée de 6.888 pastilles normales et 261 pastilles spéciales, d'un poids total de $2.146,5 \pm 0,2$ kg de UO_2 . La hauteur totale de tous les empilements donnerait $246,34 \pm 0,01$ m avec un poids total de U de $1.891,2 \pm 0,2$ kg. Les pastilles sont enfermées dans des tubes d'aluminium 1100 de 44,3 mm de diamètre extérieur et les éléments combustibles ont des pièces de fermeture supérieure et inférieure, et des pièces de centrage que assure la pleine verticalité dans le réacteur; le poids total de l'aluminium des éléments combustibles est de $340,5 \pm 0,2$ kg.

Dans cette publication où l'on peut trouver toutes les données de la fabrication et du contrôle, les auteurs décrivent en détails les étapes suivantes du procédé de fabrication des éléments combustibles: 1 - Calcinación du diuranate d'ammonium; 2 - La réduction de $U_{38}O_{10}$ en UO_2 ; 3 - Le conditionnement de la poudre de UO_2 ; 4 - La préparation des charges

pour le compactage; 5 - Le compactage des pastilles; 6 - Le frittage des pastilles; 7 - La préparation et l'inspection de tubes et des pièces d'aluminium; 8 - La préparation et l'inspection des tubes pour les éléments spéciaux; 9 - Le chargement des éléments combustibles et sa fermeture; 10 - Les traitements finaux des éléments combustibles.

ABSTRACT

The sub-critical assembly "RE-SUCO" (Oxide Sub-Critical Reactor) was designed and built at the Instituto de Energia Atômica having its main aluminum structure and scanning devices been built and offered by Willys-Overland do Brasil S.A.. The Nuclear Metallurgy Division of the I.E.A. was charged of the fabrication of all fuel elements, consisted of a column of UO_2 pellets, produced from an uranium salt of nuclear purity. The load, calculated for a value of $K_{ef} = 0.755$, was finished at november 19, 1965 and it consists of 266 fuel elements in all, 8 of them being special, with a hole for the neutron beam of a Van der Graaff accelerator. Each fuel element contains a column of UO_2 pellets with an average density of $6.86 \pm 0.04 \text{ g/cm}^3$, with $93.00 \pm 0.09 \text{ cm}$ of height. The total load consists of 6888 normal pellets besides 261 special ones, with a total mass of $2146.5 \pm 0.2 \text{ kg}$ of UO_2 . The total height of the columns of pellets is $246.34 \pm 0.01 \text{ m}$ and the total mass of contained uranium is $1891.2 \pm 0.2 \text{ kg}$. The pellets are packed in 1100 aluminum tubes with 44,3 mm of external diameter and the fuel elements have a superior and an inferior plugs, besides one piece to maintain them vertically in the reactor. The total aluminum mass of the fuel elements is $340.5 \pm 0.2 \text{ kg}$.

The authors describe in this paper, in which all the final data of fabrication are presented, the following steps of the fabrication process of the fuel elements: 1 - calcining the ammonium diuranate; 2 - reduction of U_3O_8 to UO_2 ; 3 - conditioning the UO_2 powder; 4 - charge preparation for pressing; 5 - pressing; 6 - pre-sintering of the pellets; 7 - fabrication and inspection of the 1100 al tubes; 8 - fabrication and inspection of the tubes for the special fuel elements; 9 - loading and closing the fuel elements, and 10 - surface protection of the finished fuel elements.

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS METALÚRGICAS DOS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS FABRICADOS PARA O CONJUNTO SUBCRÍTICO "RE-SUCO" (1)

THARCÍSIO D. DE SOUZA SANTOS (2)
HELITON M. HAYDT (3)
CLAUER TRENCH DE FREITAS (4)
JOSÉ DEODORO TRANI CAPOCCHI (5)
SEBASTIÃO HERMANO LEITE CINTRA (5)
ERBERTO FRANCISCO GENTILE (5)
ERNESTO COUTINHO PUCCINI (5)

R E S U M O

O conjunto subcrítico "RE-SUCO" (Reator Subcrítico de Óxido) foi projetado e construído no Instituto de Energia Atômica, com exceção da carcaça e do dispositivo de movimentação dos contadores, que foram oferecidos e construídos pela Willys-Overland do Brasil S.A., tendo a Divisão de Metalurgia Nuclear se incumbido de toda a fabricação dos elementos combustíveis, constituídos por empilhamento de pastilhas de UO_2 , a partir de sal de urânio de pureza nuclear.

A carga prevista para um valor de k_{eff} de 0,755 foi concluída a 19 de novembro de 1965 e compreende ao todo 266 elementos combustíveis, dos quais 258 são normais e 8 especiais, com orifício para passagem de feixe de nêutrons de acelerador Van de Graaff. Cada elemento combustível é constituído por empilhamento de pastilhas de UO_2 de densidade média de $6,86 \pm 0,04$ g/cm³ e tendo a altura média de $93,00 \pm 0,09$ cm. A carga total é constituída de 6.888 pastilhas normais e 261 pastilhas especiais, com massa total de $2.146,5 \pm 0,2$ kg de UO_2 . A altura total das colunas de pastilhas é de $246,34 \pm 0,01$ m e a massa total de U contido é de $1.891,2 \pm 0,2$ kg. As pastilhas são encerradas em tubo de alumínio 1100 de 44,3 mm de diâmetro externo e os elementos combustíveis têm peças de fechamento superior e inferior, além da que assegura a perfeita verticalidade no reator; a massa total de alumínio dos elementos combustíveis é de $340,5 \pm 0,2$ kg.

Com esta contribuição, na qual se enfeixam todos os dados finais de fabricação e de controle de toda a carga referida, descrevem os autores em detalhe as seguintes etapas do processo de fabricação dos elementos combustíveis: 1 — calcinação do diuranato de amônio; 2 — redução do U_2O_7 a UO_2 ; 3 — condicionamento do pó de UO_2 ; 4 — preparo das cargas para compactação; 5 — compactação das pastilhas; 6 — pré-sinterização das pastilhas; 7 — preparo e inspeção dos tubos e peças de alumínio; 8 — preparo e inspeção dos tubos para os elementos especiais; 9 — carregamento dos elementos combustíveis e seu fechamento; 10 — tratamentos finais dos elementos combustíveis.

1. INTRODUÇÃO

O conjunto subcrítico para estudos experimentais de física de reatores, conhecido pela designação "RE-SUCO (Reator Subcrítico de Óxido)", foi projetado por técnicos das antigas Divisões de Engenharia Nuclear e de Física dos Reatores do Instituto de Energia Atômica, tendo sido a sua superestrutura e o dispositivo de

movimentação dos contadores oferecidos e executados pela Willys-Overland do Brasil S.A. Coube à Divisão de Metalurgia Nuclear, primeiramente, o desenvolvimento do processo de obtenção de pastilhas de UO_2 , partindo de sal de pureza nuclear processado pela Divisão de Radioquímica, e depois, a fabricação propriamente dita dos elementos combustíveis, operação essa concluída a 19 de novembro de 1965. Na fase final dos trabalhos, de maio de 1965 e até o funcionamento do reator, a 7 de janeiro de 1966, coube ainda à Divisão de Metalurgia Nuclear a supervisão geral dos trabalhos e a articulação das providências e dos encargos confiados a numerosos técnicos de outras Divisões e Serviços do Instituto de Energia Atômica. No decurso desses trabalhos foram modificadas as especificações dos elementos combustíveis, principalmente quanto à massa de UO_2 necessário, em consequência de melhor definição de alguns parâmetros que intervêm nos cálculos e de concei-

- (1) Contribuição Técnica nº 670. Apresentada ao XXI Congresso da ABM; Volta Redonda, julho de 1966.
- (2) Membro da ABM. Chefe da Divisão de Metalurgia Nuclear, Instituto de Energia Atômica, São Paulo; Professor Catedrático e Diretor, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; São Paulo, SP.
- (3) Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista e Engenheiro Nuclear; Divisão de Metalurgia Nuclear, Instituto de Energia Atômica; São Paulo, SP.
- (4) Membro da ABM. Engenheiro Civil e Engenheiro Nuclear; Divisão de Metalurgia Nuclear, Instituto de Energia Atômica; São Paulo, SP.
- (5) Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista e Engenheiro Nuclear; Divisão de Metalurgia Nuclear, Instituto de Energia Atômica; São Paulo, SP.

tuação mais objetiva quanto ao valor esperado para " k_{ef} ".

O conjunto subcrítico é um arranjo hexagonal cuja malha é de 63 mm de lado de triângulo equilátero, cada vértice sendo ocupado por um elemento combustível, constituído por pastilhas de UO_2 de 40,2 mm de diâmetro, envolvidas por tubo de alumínio, todo o conjunto de elementos combustíveis estando imerso em água deionizada, servindo como moderador e refletor. Dois arranjos diferentes dos elementos combustíveis foram previstos: um, utilizando fonte de nêutrons (α, n) a ser localizada no centro do hexágono, empregando 258 elementos e mais 6, ditos "especiais" nos vértices externos do arranjo; outro, empregando feixe de nêutrons proveniente de um acelerador Van de Graaff; nesse caso existem também 264 elementos ao todo, sendo 8 de tipo "especial", dotados de orifício para passagem do tubo de alumínio dentro do qual é colimado o feixe de nêutrons.

Certamente a parte mais importante do conjunto, inclusive pelo seu valor, é a representada pelos elementos combustíveis. Como se disse, foi desde o início dos trabalhos estabelecido que seriam constituídos por pastilhas de UO_2 de densidade relativamente baixa, não só porque êsse característico resultava das condições de cálculo para a geometria fixada, como também porque dessa forma não se dificultaria o aproveitamento ulterior do urânio imobilizado, além da vantagem adicional de baixar sensivelmente o custo de fabricação.

Em trabalhos apresentados aos XVII, XVIII e XIX Congressos Anuais da ABM^{1, 2, 3, 4} e à III Conferência Mundial sôbre Aplicações Pacíficas da Energia Atômica⁵ foram descritos os estudos de desenvolvimento e os aparelhos e fornos utilizados.

Com a conclusão dos trabalhos de fabricação dos elementos combustíveis pareceu conveniente enfeixar nesta contribuição os principais detalhes do processo, bem como os resultados obtidos em tôdas as etapas.

2. ESPECIFICAÇÕES DOS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS

Em virtude das alterações introduzidas na fabricação da placa-base para assegurar o espaço necessário para a passagem de contadores e dos aperfeiçoamentos nos cálculos iniciais pelas Divisões especializadas do Instituto de Energia Atômica, foram modificadas as especificações originais, já mencionadas em outros trabalhos^{3, 4}. Assim, desde fins de maio de 1965 foram estabelecidas as especificações definitivas, as quais constam do quadro I.

QUADRO I — Especificações principais do Conjunto Subcrítico "RE-SUCO" e de seus elementos combustíveis

Massa total de UO_2 para $k_{ef} = 0,755^5$	2.130 ± 20 kg
Malha triangular equilátera ..	63 mm
Número de fiadas segundo o raio (exclusive a referente à posição central)	8
Número de elementos combustíveis normais	258
Número de elementos combustíveis "especiais"	8
Número de elementos combustíveis para o arranjo com fonte central (258 + 6)	264
Número de elementos combustíveis para o arranjo "Van de Graaff" (256 + 8)	264
Diâmetro das pastilhas de UO_2	40,2 ± 0,1 mm
Diâmetro externo dos tubos de alumínio	44,5 ± 0,2 mm
Diâmetro interno dos tubos de alumínio	40,5 ± 0,2
Altura da coluna de pastilhas de UO_2	93,0 ± 0,3 mm
Densidade das pastilhas de UO_2	6,70 ± 0,20 g/cm ³
Relação U/Al	5,5 ± 0,3

3. DESCRIÇÃO DA FABRICAÇÃO

3.1 — GENERALIDADES — Os últimos aperfeiçoamentos introduzidos desde a elaboração do trabalho⁴, no qual os autores descreveram as principais operações e os fornos e aparelhos utilizados, permitiram estabelecer em definitivo o diagrama de seqüência das operações para a fabricação dos elementos combustíveis que satisfizessem as especificações constantes do quadro I. O diagrama está reproduzido na figura 1 e nele estão indicadas claramente as interrelações com as fases do processo, bem como os meios de controle adotados.

Os cronogramas estabelecidos foram observados no transcórper de todos os trabalhos, não tendo surgido surpresas ou fatores imprevistos, a não ser ligeiras dificuldades que foram encontradas em virtude de grande variação de característicos do sal de urânio recebido.

Além dos autores, que estiveram ocupados com outros encargos, os trabalhos foram desenvolvidos pelos técnicos e outros auxiliares, num total de 9 colaboradores. Cumpre observar que durante 10 meses foi necessário estender o horário de serviço normal por mais 3 horas, além de ter sido necessário trabalho durante todo o dia de sábado.

Especial atenção foi dedicada pelos autores aos trabalhos de controle da fabricação, conforme será mostrado mais adiante. Êsse controle revelou-se de grande valor para determinar o nível de qualidade da produção, para garantir os limites fixados pelas especificações e para as-

segurar elevado nível de produtividade de todo o grupo, durante o transcorrer dos serviços, desde a operação de calcinação até a de tratamento final dos elementos combustíveis.

Passam-se agora a descrever cada uma das operações constantes do diagrama da figura 1.

80% de material na faixa $-100 + 325$ mesh. Sua densidade aparente era bastante baixa, conforme mostram os seguintes índices: densidade sôlta $0,75 \text{ g/cm}^3$, densidade batida $0,95 \text{ g/cm}^3$ e densidade limite $1,0 \text{ g/cm}^3$.

A calcinação foi realizada em fornos elétri-

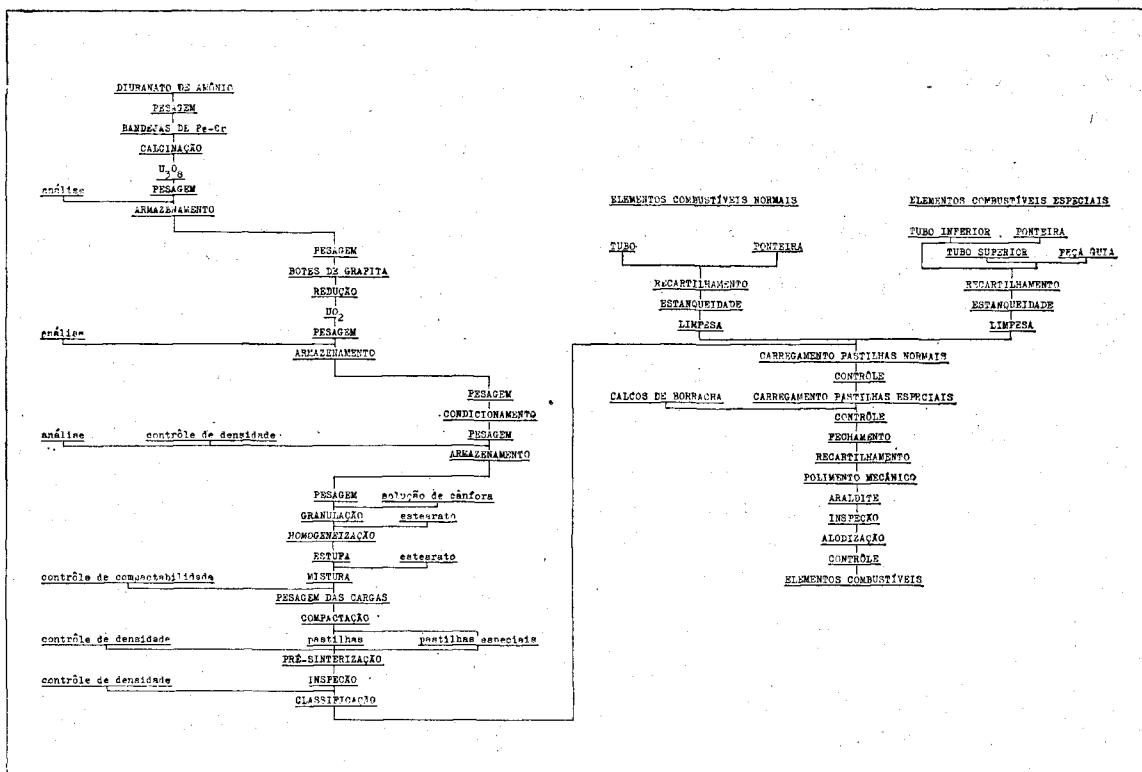


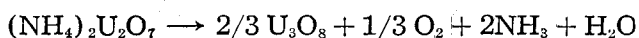
Fig. 1 — Diagrama de seqüência das operações de fabricação dos elementos combustíveis.

3.2 — CALCINAÇÃO DO DIURANATO DE AMÔNIO — O sal de urânio de pureza nuclear purificado pela Divisão de Radioquímica é diuranato de amônio contendo teores variáveis, por vezes muito elevados, de SO_4 , provavelmente na forma de sulfato de urânio. Algumas amostras de partidas tratadas indicaram teor de SO_4 de até 16,48%. A presença desse elevado teor de enxôfre na forma de sulfato exigiu prévia calcinação, para evitar que pudesse coincidir com a pré-sinterização, principalmente por ter sido inicialmente prevista a necessidade de pré-sinterização para atingir a densidade especificada. Se se tratasse apenas de diuranato de amônio, ter-se-ia podido suprimir essa operação de calcinação prévia, uma vez que poderia esse sal ser dissociado e reduzido diretamente a UO_2 na operação de redução sob hidrogênio. Os estudos experimentais realizados mostraram que a dissociação do sulfato presente era praticamente completa quando a calcinação era realizada a 875°C durante 3 horas. Nessas condições o teor de S residual era sempre inferior a 100 ppm.

O diuranato de amônio recebido tinha coloração amarelo-laranja e apresentava de 70 a

cos de laboratório, de mufla, tendo sido inserido revestimento de aço inoxidável com o objetivo de evitar o ataque das resistências pelos gases da dissociação do sulfato presente. O diuranato de amônio era carregado em bandejas de ferro fundido de 26-28% Cr, as quais podiam ser empilhadas umas sobre outras, deixando espaço para saída de gases e para entrada de pá para o transporte da bandeja. As dimensões dessas bandejas eram: largura 235 mm, profundidade 45 mm, comprimento 405 ou 495 mm e espessura de parede 10 mm. O peso de cada bandeja menor era de 9 a 10 kg e o da maior de 10,5 a 11,5 kg.

A dissociação térmica do diuranato de amônio a 450°C corresponde à reação

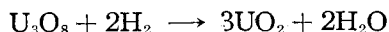


e assim obter-se-iam 900 g de U_3O_8 pela calcinação de 1000 g de diuranato de amônio. O valor médio obtido no processamento de cerca de 3.500 kg de sal recebido, foi de 660 g/kg. A diferença corresponde a teores relativamente

baixos de umidade e principalmente a sulfato presente.

O U_3O_8 calcinado obtido era pó solto de cor negra e não exibia nenhuma tendência de auto-sinterização. Era retirado facilmente das bandejas, as quais só apresentavam descascamentos periódicos por oxidação. O comportamento das bandejas foi plenamente satisfatório, apresentando boa resistência aos gases corrosivos e às deformações provenientes da temperatura relativamente elevada. As trincas que foram constatadas em diversas bandejas, geralmente depois de poucas dezenas de operações, eram habitualmente resultantes de choques térmicos, ao serem retiradas dos fornos para resfriamento ao ar. A contaminação do pó pela casca de oxidação das bandejas e que não podia ser separada, nunca foi muito superior a 5 ppm de Cr, o que é perfeitamente tolerável.

3.3 — REDUÇÃO DO U_3O_8 A UO_2 — O dióxido de urânio destinado à fabricação das pastilhas foi obtido por redução de U_3O_8 pelo hidrogênio em fornos elétricos tubulares, especialmente construídos para a Divisão de Metalurgia Nuclear⁴. A redução obedece à seguinte reação:



Cumpra observar que o produto sólido não é UO_2 estequiométrico, mas solução sólida contendo excesso de oxigênio UO_{2+x} , os valores da relação O/U habitualmente variando até 2,06. Visto como não era necessário sinterizar as pastilhas em temperaturas elevadas, procuraram-se ajustar as condições de redução de forma a que o valor da relação O/U não excedesse 2,04. A figura 2 reproduz o histograma da distribuição dos valores determinados em 63 amostras de pó reduzido, retiradas durante o desenvolvimento dos trabalhos. Em mais da metade das amostras o valor obtido foi de 2,02.

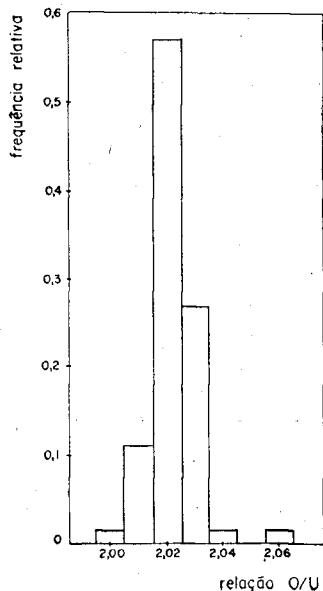


Fig. 2 — Histograma da distribuição dos valores de O/U em 63 amostras de pó reduzido em hidrogênio.

A velocidade de passagem dos botes com a carga no forno de redução para as temperaturas adiante indicadas determinava modificações no valor da relação O/U, como mostraram os resultados obtidos, reunidos na tabela I.

TABELA I — Influência do intervalo de carregamento dos botes sobre o valor da relação O/U

Intervalo de carregamento (min)	Relação O/U
10	2,06
20	2,02
30	2,01

A redução foi realizada em dois fornos elétricos tubulares de 100 mm de diâmetro interno e de cerca de 3,5 m de comprimento, com duas zonas de comando independente de temperatura, a anterior, ajustada em 400°C, e a de redução propriamente dita, ajustada em 700°C. A figura 3 mostra o aspecto de um dos fornos de redução construídos especialmente para a redução do U_3O_8 a UO_2 ; esses fornos funcionam sob pressão positiva de hidrogênio e têm as câmaras das extremidades purgadas por argônio. Em virtude da piroforicidade do material reduzido, os botes que encerram o pó, antes da descarga, passam por câmara resfriada por circulação de água, atingindo assim temperatura próxima da do ambiente.



Fig. 3 — Fotografia mostrando um dos fornos de redução construídos especialmente para a redução a UO_2 ; notar os indicadores das duas zonas de redução e a camisa de água do forno na zona de descarga.

As cargas de U_3O_8 eram pesadas cuidadosamente em capela sob exaustão ajustável e dotada de filtros para recuperação de poeiras que acaso se formassem nas operações de manipulação; eram carregadas, em seguida, em botes de grafita, em forma de meia cana e de projeto

especial, e que podiam ser articulados de modo a constituir um trem contínuo no forno de redução. As dimensões desses botes eram as seguintes: comprimento 310 mm, largura 94 mm, profundidade maior 45 mm e espessura de parede 11 mm, massa 800 g. Cada bote recebia 500 g de U_3O_8 e o carregamento era feito com intervalo de 30 minutos. Cada bote permanecia 30 minutos na zona ajustada em 400°C e 60 minutos na zona a 700°C. O tempo total de passagem de cada bote pelo forno era de 4 horas.

O comportamento das muflas tubulares de ferro fundido foi plenamente satisfatório, tendo sido relativamente reduzida a formação de cascas de oxidação no exterior dos tubos nas zonas mais aquecidas. Em todo o transcorrer dos trabalhos que se prolongaram por cerca de dez meses, apenas duas vezes se verificaram explosões por escape e reação do hidrogênio, provocados por trincas ou furos.

O consumo efetivo de hidrogênio medido cuidadosamente durante o trabalho foi de 0,795 m^3/kg de UO_2 , quando estequiométricamente são necessários apenas 0,055 m^3/kg .

3.4 — CONDICIONAMENTO DO PÓ DE UO_2 — O condicionamento compreende a mistura e homogeneização das cargas do pó reduzido, a moagem parcial dos grânulos de UO_2 e a modificação da superfície dos mesmos pelo efeito de adensamento, adaptando assim o material para a operação subsequente. É uma das fases mais importantes no processamento, principalmente quando se desejam obter elevadas densidades nas pastilhas, sob baixas pressões de compactação.

O pó, tal como recebido da operação de redução, apresenta densidade batida variável entre 1,6 e 2,0 g/cm^3 , valor muito baixo e que não permitiria a produção de pastilhas de densidade desejada.

Conforme foi mostrado experimentalmente em trabalho anterior⁴, para atingir o valor desejado da densidade era necessário que a densidade batida fosse pelo menos de 4,0 g/cm^3 , e que esse valor podia ser obtido por meio de moagem, durante 24 horas, da carga em moinhos de bolas, girando com a velocidade periférica de 26 m/min. Em alguns casos e quando com esse condicionamento ainda não se conseguia atingir o valor indicado, a operação devia ser prolongada, de forma a se atingir aquele índice.

O aumento da densidade batida pelo condicionamento é conseqüência de dois efeitos superpostos: a) redução da granulometria do pó pela moagem; e b) adensamento dos grânulos pelo efeito do rolamento das bolas de aço sobre o pó.

A operação foi realizada em moinhos de aço doce revestidos internamente com borracha

vulcanizada; 12 moinhos podiam funcionar simultaneamente, girando a 86 rpm, no conjunto acionado por motor elétrico. Em cada um desses moinhos, de 5 dm^3 de volume útil, carregavam-se 3 kg de carga e 3 kg de bolas de aço, de rolamento, de 12 mm de diâmetro. A contaminação total de ferro no material foi sempre inferior a 708 ppm.

Depois do condicionamento, o valor médio da densidade batida foi de 4,24 g/cm^3 , com desvio padrão de 0,20 g/cm^3 .

A produção total de material condicionado foi de 2300 kg, tendo sido necessário aumentar o período de moagem para apenas cerca de 300 kg de material que, para o tempo indicado, não apresentou densidade batida dentro dos limites indicados.

3.5 — PREPARO DAS CARGAS PARA COMPACTAÇÃO — A compactação direta das cargas, tal como descarregadas dos moinhos de condicionamento, oferece duas dificuldades, a saber: a) a ocorrência de trincas na operação de compactação; b) reduzida resistência das pastilhas à manipulação, tornando difícil seu carregamento nas unidades de pré-sinterização.

O emprêgo de aglomerante e de lubrificante na carga permite solucionar ambos os problemas, diminuindo a ocorrência de trincas e aumentando a resistência mecânica das pastilhas produzidas. Os trabalhos experimentais realizados mostraram que o aglomerante mais eficaz para as condições de produção era cânfora, empregada na proporção de 1,5% do peso da carga, e que a lubrificação podia ser assegurada com o emprêgo de apenas 0,5% de estearato de zinco.

A cânfora foi adicionada sob a forma de solução alcoólica de 330 g/l, a operação sendo feita manualmente sobre lotes de 1,5 kg de UO_2 . A mistura era, a seguir, passada em peneira de 20 malhas, o que provocava certa granulação da carga. A seguir, era a carga acondicionada em moinho sem bolas durante meia hora, adicionando-se então 0,25% de estearato de zinco. Descarregado o moinho, era a carga levada para estufa a 60°C para eliminação do álcool, depois do que se adicionavam os restantes 0,25% de estearato de zinco. Os ensaios então realizados mostraram que não havia perda sensível de cânfora nessa operação.

Os registros das cargas indicaram terem sido preparados 2.674 kg de UO_2 , utilizando-se 38,62 kg de cânfora e 68,7 litros de álcool a 95%. A média diária de cargas preparadas foi de 46 kg com recirculação da ordem de 11,5%.

3.6 — COMPACTAÇÃO DAS PASTILHAS — A compactação das pastilhas foi feita em matrizes flutuantes, em prensas hidráulicas de fabricação nacional, de acionamento manual ("Farex"), de

25 e de 80 t, ou de acionamento automático ("Fred Fry"), de 30 t de esforço máximo, sob pressões de compactação entre 1,6 e 2,4 t/cm². Dada a variação da compactabilidade dos pós indicada pela sua densidade batida, para cada partida era determinada a pressão de compactação necessária para se atingir, no estado compactado, a densidade que permitisse, ulteriormente, após a eliminação do aglomerante e do lubrificante na operação de pré-sinterização, os valores especificados. Em trabalho anterior⁴ mostraram os autores a influência da densidade batida do pó e da pressão de compactação sobre a densidade das pastilhas.

Para atingir os valores indicados na especificação do quadro I, era necessário que as pastilhas no estado compactado (antes da pré-sinterização) apresentassem diâmetro de $40,2 \pm 0,1$ mm e densidade aparente de $6,90 \pm 0,27$ g/cm³.

Esses característicos foram verificados através de completo controle estatístico, fazendo-se primeiramente uma amostragem segundo tabela de números ao acaso, em lotes de 100 pastilhas. Posteriormente, com a utilização da prensa automática "Fred Fry", passou-se a adotar a amostragem em lotes correspondentes à produção de cada dia de trabalho. Os dados obtidos eram representados em gráficos de controle de média e de desvio padrão (figs. 4 e 5). Durante todo o processamento, não houve perda de nenhum lote de pastilhas. Quanto à especificação de den-

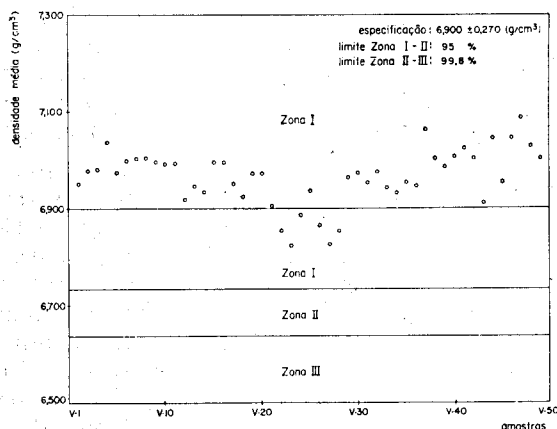


Fig. 4 — Gráfico de controle da média de pastilhas no estado compactado.

sidade, houve uma modificação, tendo sido eliminado o limite superior, uma vez que há vantagem em se aumentar a densidade do material.

Para a produção total de pastilhas os valores obtidos para a média e para o desvio padrão foram $6,966 \pm 0,068$ g/cm³. Como mostra a figura 5, as flutuações obtidas no processo eram muito menores do que as correspondentes à especificação. Construiu-se, por isso, um novo gráfico de desvios-padrão, tomando-se como

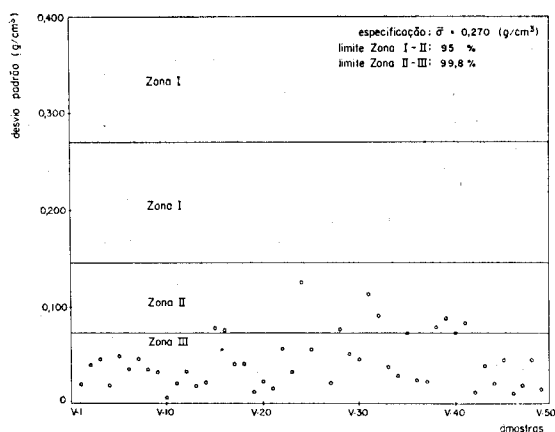


Fig. 5 — Gráfico de controle do desvio-padrão de pastilhas no estado compactado.

desvio-padrão médio o valor obtido para toda a produção, isto é, de $0,068$ g/cm³ (fig. 6). Com base nesse novo gráfico, calculou-se novo desvio-padrão médio, resultando assim como especificação ideal para o processo de fabricação, utilizando o mesmo equipamento, o valor $6,900-0,054$ g/cm³.

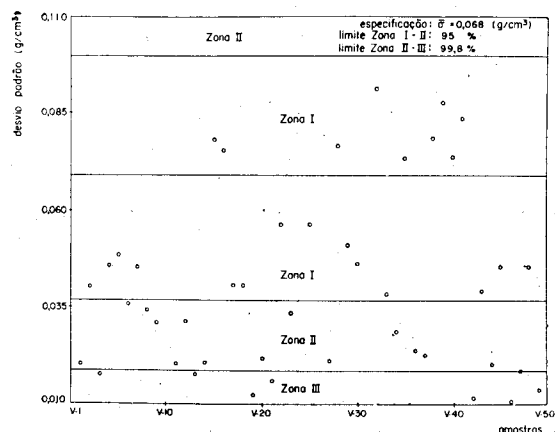


Fig. 6 — Gráfico de desvios-padrão, executado para o desvio-padrão médio de toda a produção.

3.7 — PRÉ-SINTERIZAÇÃO DAS PASTILHAS —

Visto como as densidades especificadas puderam ser facilmente atingidas e ultrapassadas, graças aos característicos dos pós produzidos nas etapas precedentes do processamento, a pré-sinterização reduziu-se na realidade a uma operação de eliminação do aglomerante e do lubrificante utilizados.

Determinaram-se inicialmente as condições mínimas de tempo e de temperatura para promover a destilação e a pirólise parcial daqueles agentes sob atmosfera protetora e à pressão atmosférica; experiências realizadas sob vácuo de 2 mm Hg mostraram sempre sensível oxidação superficial das pastilhas. Nas condições dos carregamentos adotados, os tempos variaram entre 3 e 5 horas para a temperatura de 350°C.

As operações foram realizadas em três fornos, a saber: 1) forno de redução; 2) forno de pré-sinterização; 3) retorta de 1200 mm de comprimento e de 200 mm de diâmetro introduzida em forno elétrico (“Combustol Ltda.”), que podia tratar de cada vez 160 pastilhas, em armação metálica introduzida por uma das extremidades. Em todos esses fornos as operações foram sempre realizadas sob atmosfera de nitrogênio.

Durante todo o processamento foram fabricadas 7.998 pastilhas, tendo sido rejeitadas, por trincas apresentadas geralmente depois da pré-sinterização e por acidentes de manipulação, 944.

A tabela II reúne os principais dados referentes às operações de pré-sinterização realizadas entre 20 de setembro e 3 de novembro, compreendendo 4.204 pastilhas.

TABELA II — Principais dados referentes à pré-sinterização de 4.204 pastilhas a 350°C

CARACTERÍSTICAS	Forno de redução	Forno de sinterização	Forno de retorta
Capacidade (pastilhas/dia)	72	52	160
Nº de pastilhas sinterizadas	904	883	2.417
Nº de pastilhas perdidas por defeitos na sinterização	20	1	60

Após concluída a pré-sinterização, eram as pastilhas examinadas para rejeitar aquelas que apresentassem quaisquer trincas visíveis ou defeitos superficiais, principalmente camada oxidada, e por amostragem, medidas cuidadosamente para determinação da densidade e comparação dos valores obtidos com o das especificações do quadro I. A amostragem foi feita, como no caso das pastilhas no estado compactado, segundo tabela de números ao acaso, em lotes de 100 pastilhas. Os resultados obtidos eram representados em gráficos de média e de desvio-padrão. As figuras 7 e 8 reproduzem os gráficos de média e desvio-padrão da densidade.

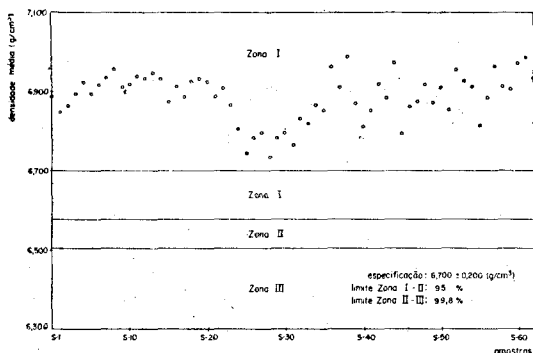


Fig. 7 — Gráfico de controle da média de pastilhas pré-sinterizadas.

Para a produção total das pastilhas do “RE-SUCO” estimou-se a densidade média e respectivo desvio-padrão em $6,886 \pm 0,055 \text{ g/cm}^3$.

Analogamente ao tratamento dado para as pastilhas a verde, foram construídos os gráficos apresentados nas figuras 8 e 9, onde tomaram-se sucessivamente os desvios-padrão médios, $0,200 \text{ g/cm}^3$ e $0,055 \text{ g/cm}^3$.

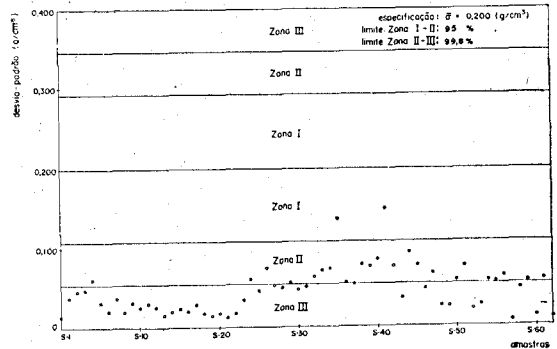


Fig. 8 — Gráfico de controle do desvio-padrão de pastilhas pré-sinterizadas.

Do gráfico da figura 9, da mesma maneira que o gráfico da figura 6, recalculou-se qual seria a nova especificação ideal para as pastilhas pré-sinterizadas, que foi de $6,700 - 0,043 \text{ g/cm}^3$.

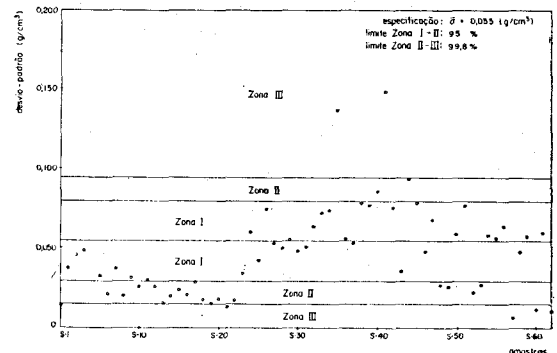


Fig. 9 — Gráfico de desvios-padrão, executado para o desvio-padrão médio de toda a produção de pastilhas pré-sinterizadas.

3.8 — PREPARO E INSPEÇÃO DOS TUBOS E PEÇAS DE ALUMÍNIO — Os elementos combustíveis “RE-SUCO” são constituídos por empilhamento das pastilhas de UO_2 inseridas em tubo de alumínio 1100, fechado superiormente por peça apropriada, também em alumínio. Com o objetivo de manter os elementos combustíveis em posição rigorosamente vertical, existe abaixo da placa-apoio outra placa perfurada, cujos centros de orifícios correspondem aos daquela, conforme mostra a figura 10; termina assim inferiormente o elemento combustível por uma peça cilíndrica co-axial com a superior, também construída em tubo de alumínio 1100. Reproduz a tabela III a especificação da liga 1100 (alumínio comer-

cial 1100), a qual serviu de base para a encomenda feita à Companhia Brasileira de Alumínio, que forneceu todo o material necessário.

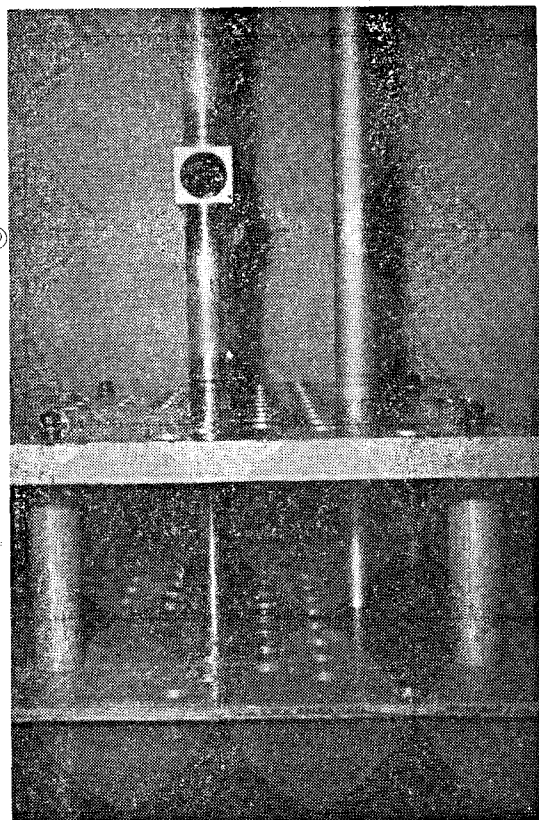


Fig. 10 — Fotografia mostrando, em placas para medidas dos elementos combustíveis, um elemento combustível normal (à direita) e um especial (à esquerda), vendo-se a placa-apoio e a placa perfurada de base, para assegurar a perfeita verticalidade do elemento combustível.

TABELA III — Especificação da liga Al-1100 conforme Reactor Handbook ⁷

ELEMENTO	% (max)
Cu	0,2
Si + Fe	1,0
Mn	0,05
Zn	0,10
Outros (soma) ..	0,15

A figura 11 reproduz os principais detalhes do tubo de revestimento e de peças de fechamento e de guia, constituídas assim essencialmente de três partes, a saber:

- 1) *Tampa superior* — Peça obtida por usinagem de barra cilíndrica, dotada de orelha para facilitar as operações de carregamento e de armazenamento do elemento combustível, e destinada a vedar o ele-

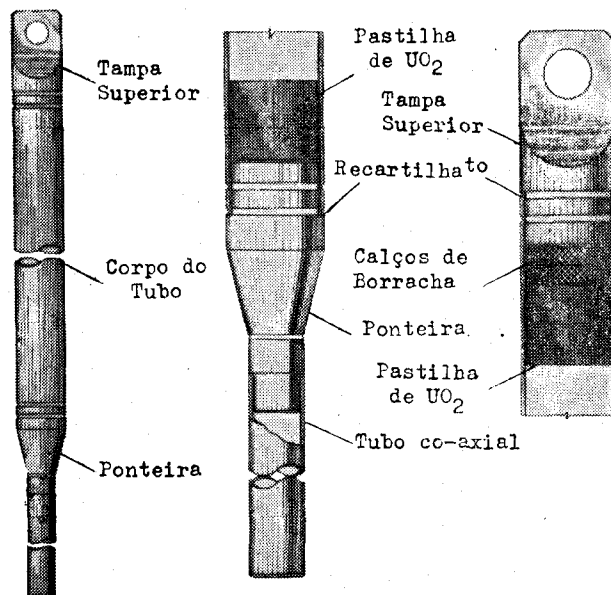


Fig. 11 — Detalhes principais do tubo de revestimento e das peças de fechamento e de guia dos elementos combustíveis normais.

mento combustível em sua parte superior. A fixação dessa tampa ao tubo que contém as pastilhas é feita por meio de recartilhamento sobre dois sulcos de cerca de 3 mm de profundidade e afastados um do outro de 15 mm. Uma vez introduzido o tucho da parte inferior da tampa na boca do tubo, o material das paredes do tubo é forçado a fluir para os sulcos do tucho, por meio de ferramenta especial, a operação sendo realizada em torno.

- 2) *Corpo do tubo* — O tubo constitui o revestimento dos elementos combustíveis; tem 40,5 mm de diâmetro interno e 2 mm de espessura de parede. Os tubos cortados têm comprimento médio de 967,5 mm.
- 3) *Ponteira inferior* — Serve para assegurar o apoio na placa-apoio e o correto posicionamento na posição vertical, por meio da ponteira inferior, a qual encontra orifício correspondente, de centro coincidente com o da placa-apoio, em placa-guia inferior; além disso, em sua parte mais alta, serve para fechar a extremidade inferior do tubo de revestimento. O fechamento foi executado também por meio de recartilhamento. Abaixo da parte tronco-cônica, destinada a assegurar perfeito contato com orifício tronco-cônico correspondente da placa-apoio, encontra-se a ponteira inferior constituída por tubo co-axial, também de alumínio Al-1100, fechado por peça usinada de barra do mesmo material.

Tôdas as operações de usinagem foram executadas na Oficina Mecânica do IEA, sob a supervisão direta do Sr. J. Ferreira, Chefe da referida Oficina, e a quem devem os autores, além de valiosas sugestões, a idéia de adotar o recartilhamento como meio eficaz e econômico para o fechamento dos elementos combustíveis.

A preparação dos tubos antes do carregamento das pastilhas foi feita da forma seguinte: recebidos os tubos com o recartilhamento já executado sobre a peça de ligação com a ponteira inferior, passou-se a ensaiar a estanquei-

dade do tubo, procedendo-se em seguida à limpeza do tubo em sua parte interior; depois de concluído o carregamento das pastilhas, operação realizada conforme será descrito no capítulo subsequente, era colocada a tampa e executado o recartilhamento superior; em seguida o conjunto assim fechado era submetido a novo ensaio de estanqueidade; verificado não existirem escapamentos de ar no ensaio, era então aplicada sobre as juntas extremas do tubo duas delgadas camadas de "araldite", como garantia complementar de estanqueidade dos elementos combustíveis fechados.

a) *Ensaio de estanqueidade da junção inferior recartilhada e do tubo* — Esse ensaio foi feito mediante injeção de nitrogênio ou de argônio pela parte superior do tubo, em posição vertical, mantendo-se o mesmo imerso em água durante o ensaio. Foi construído para isso um dispositivo especial para ensaio, que facilitava sobremodo a observação de qualquer eventual vazamento, logo evidenciado pelo escape de bolhas de gás na água. A pressão do gás era mantida em 0,4 atm; nos casos em que existiam orifícios no tubo ou defeitos nas zonas recartilhadas o borbulhamento já surgia mesmo para pressões de apenas 0,1 atm.

Foram realizados 343 ensaios de recartilhamento para verificar a estanqueidade dos 258 elementos combustíveis normais. Inicialmente apenas 68% dos tubos fechados inferiormente foram aceitos, 32% tendo de ser submetidos a nova operação de recartilhamento. Após se ter adotado dupla operação de recartilhamento, de 66 tubos ensaiados apenas 1 precisou ser rejeitado por defeito encontrado.

b) *Ensaio de estanqueidade do tubo carregado* — Depois de executado o carregamento das pastilhas e uma vez feito o recartilhamento do tubo sobre a tampa, como se descreveu, passou-se a ensaiar a estanqueidade do conjunto e principalmente o recartilhamento da parte superior. O ensaio desenvolvido para esse fim consistia essencialmente em se aquecer, por meio de resistência elétrica apropriada, o tubo em sua parte central; o ar contido no interior, ao se dilatar, forçaria a passagem através de quaisquer orifícios existentes. A sensibilidade do ensaio foi antes comprovada tendo-se construído um elemento combustível propositalmente defeituoso. O ensaio era contudo bastante demorado, exigindo cerca de 30 minutos por tubo. Foi utilizado apenas para orientar a execução do recartilhamento superior, tendo sido considerado supérfluo, uma vez que na operação de alodização, pelo mesmo princípio adotado, perceber-se-iam defeitos que acaso existissem na zona recartilhada superior.

3.9 — PREPARO E INSPEÇÃO DOS TUBOS PARA OS ELEMENTOS ESPECIAIS — Como se disse ante-

riormente, para a variante de operação do reator em que se utilizará feixe de nêutrons criado por acelerador Van de Graaff, foram construídos oito elementos combustíveis, aqui chamados "especiais", e dotados de peça na zona inferior através da qual poderá ser inserido um tubo de alumínio, o chamado "nariz" do acelerador Van de Graaff. A figura 12 mostra os detalhes principais desses elementos combustíveis e suas peças constituintes, as seguintes: 1) *tampa superior*; 2) *tubo superior*; 3) *peça-guia*; 4) *tubo inferior* e 5) *ponteira*. A tampa superior e a ponteira são semelhantes às peças correspondentes dos elementos normais. A peça-guia é inserida na zona média inferior do tubo, dividindo-o em duas partes, tubo superior e tubo inferior. Os tubos são ligados à tampa superior e à peça-guia, e à peça-guia e à ponteira, por meio de recartilhamento, executado exatamente como foi descrito para o caso dos elementos normais.

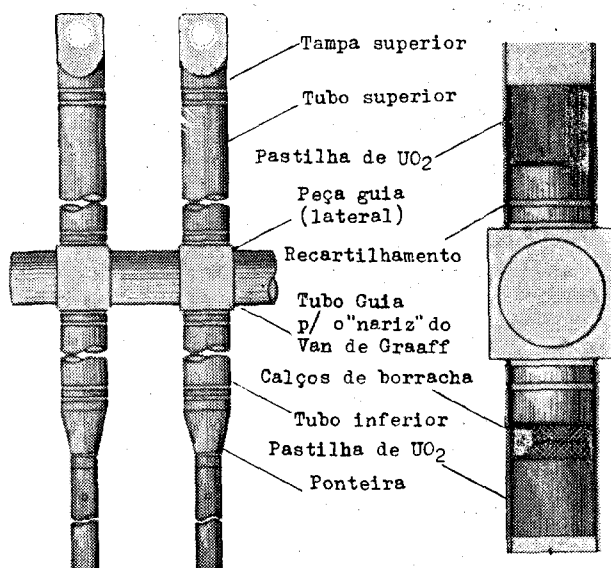


Fig. 12 — Desenho mostrando os principais detalhes dos elementos combustíveis especiais.

Foram também executados separadamente os ensaios de estanqueidade da parte inferior (ponteira — tubo inferior) e da parte superior (peça-guia — tubo superior), tendo sido também aplicadas camadas de araldite nas zonas de ligação do tubo com as peças de fechamento.

3.10 — CARREGAMENTO DOS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS E SEU FECHAMENTO — Concluído o ensaio de estanqueidade da junção recartilhada e do tubo, e após limpeza interna final, feita com tetracloreto de carbono, passou-se à operação de carregamento das pastilhas pré-sinterizadas.

Do quadro I consta a especificação da altura da coluna de pastilhas, de $93,0 \pm 0,3$ cm. Para os tubos especiais a especificação da altura total, soma das alturas do trecho inferior e do trecho superior, foi fixada em $80,0 \pm 0,3$ cm; nessas condições a pastilha mais baixa e a

TABELA IV

IEA-DMN

FC-9A

QUADRO DE CONTRÔLE: CARREGAMENTO E FECHAMENTO									
DESIGNAÇÃO: IEA-DMN-Nº 200 MASSA DA COLUNA DE UO ₂ : 8.183,2 g ALTURA DA COLUNA DE UO ₂ : 93,02 cm DENSIDADE MÉDIA DA COLUNA: 6,93 g/cm ³									
PASTILHAS NORMAIS									
POSICÃO	Nº PASTILHA	POSICÃO	Nº PASTILHA	POSICÃO	Nº PASTILHA	POSICÃO	Nº PASTILHA		
1	4608	8	4673	15	5431	22	5252	MASSA DO TUBO + PONTEIRA (M ₁)	1.034,8 g
2	4676	9	5440	16	5294	23	5226	(H ₁)	96,72 cm
3	4660	10	5445	17	5277	24	5270	MASSA DO TUBO E PONTEIRA + PASTILHAS UO ₂ = (M ₂)	9.218,0 g
4	4609	11	5423	18	5265	25	7082	(H ₃)	3,67 cm
5	4601	12	5421	19	5299	26	7237	MASSA DO PLUG SUPERIOR	235,8 g
6	4675	13	5485	20	5283	27		MASSA TAMPOS DE BORRACHA	9,808 g
7	4610	14	5454	21	5291	28		MASSA TOTAL	9.463,6 g
								MASSA DO ELEMENTO FECHADO	9.463,0 g

(H ₂) = 7,370 cm					
Altura determinada para pastilha especial = (H ₂ - H ₁ + 93,00) = 3,65 cm					
CARACTERÍSTICAS DAS PASTILHAS ESPECIAIS					
POSICÃO	Nº PASTILHA	MASSA (g)	ALTURA (cm)	DIÂMETRO (cm)	DENSIDADE g/cm ³
27	E - 200	317,8	3,655	4,020	6,85

OBSERVAÇÕES:					
CARREGAMENTO Pastilhas normais		CARREGAMENTO Pastilha Especial		FECHAMENTO	
DATA	RESP.	DATA	RESP.	DATA	RESP.
05.11.65	Capocchi	12.11.65	Cintra	12.11.65	Haydt

TABELA V

IEA-DMN

FC-9B

QUADRO DE CONTRÔLE: CARREGAMENTO E FECHAMENTO											
DESIGNAÇÃO: IEA-DMN-Nº 81 MASSA DA COLUNA DE UO ₂ : 8.181,5 g ALTURA DA COLUNA DE UO ₂ : 92,97 cm DENSIDADE MÉDIA DA COLUNA: 6,93 g/cm ³											
CARACTERÍSTICAS DAS PASTILHAS NORMAIS											
POSICÃO	Nº PASTILHA	MASSA g	ALTURA cm	DIÂMETRO cm	DENSIDADE g/cm ³	POSICÃO	Nº PASTILHA	MASSA g	ALTURA cm	DIÂMETRO cm	DENSIDADE g/cm ³
1	2452	301,0	3,417	4,020	6,94	15	2466	301,2	3,422	4,020	6,93
2	2453	300,6	3,415	4,020	6,93	16	2467	300,7	3,413	4,020	6,91
3	2454	301,0	3,418	4,020	6,94	17	2468	301,2	3,418	4,020	6,94
4	2455	301,1	3,418	4,020	6,94	18	2469	301,1	3,418	4,020	6,94
5	2456	300,9	3,414	4,020	6,94	19	2470	301,1	3,403	4,020	6,97
6	2457	300,8	3,405	4,020	6,96	20	2471	300,5	3,408	4,020	6,95
7	2458	300,8	3,418	4,020	6,93	21	2472	300,8	3,405	4,020	6,96
8	2459	300,8	3,413	4,020	6,94	22	2473	301,3	3,422	4,020	6,94
9	2460	300,6	3,409	4,020	6,95	23	2474	300,6	3,414	4,020	6,94
10	2461	300,9	3,400	4,020	6,97	24	2475	300,8	3,413	4,020	6,94
11	2462	300,7	3,413	4,020	6,94	25	2476	301,8	3,418	4,020	6,94
12	2463	300,2	3,406	4,020	6,94	26	2477	300,6	3,408	4,020	6,95
13	2464	301,0	3,416	4,020	6,94	27					
14	2465	300,6	3,417	4,020	6,93	28					

(H ₂) = 7,832 cm					
Altura determinada para pastilha especial = (H ₂ - H ₁ + 93,00) = 4,13 cm					
CARACTERÍSTICAS DAS PASTILHAS ESPECIAIS					
POSICÃO	Nº PASTILHA	MASSA g	ALTURA cm	DIÂMETRO cm	DENSIDADE g/cm ³
27	E-81	365,6	4,127	4,020	6,98

± MASSA DAS PASTILHAS		± ALTURA DAS PASTILHAS		DENSIDADE MÉDIA DAS PASTILHAS	
8.187,5 g		92,868 cm		6,94 g/cm ³	
Massa do tubo e ponteira: M ₁ 1.032,5 g H ₁ 96,70 cm					
MASSA DO TUBO E PONTEIRA + PASTILHAS UO ₂ = (M ₂) 9.214,0 g					
H ₃ 3,726 cm					
Massa do plug superior		240,1 g	Massa tampos de borracha		8,074 g
Massa total		9.462,2 g		Massa do elemento fechado 9.452,0 g	

OBSERVAÇÕES:					
CARREGAMENTO Pastilhas normais		CARREGAMENTO Pastilha Especial		FECHAMENTO	
DATA	RESP.	DATA	RESP.	DATA	RESP.
01.10.65	Cintra	27.10.65	Puccini	03.11.65	Freitas

pastilha mais alta ficavam precisamente no mesmo nível das pastilhas correspondentes dos elementos normais.

A especificação para densidade de coluna foi estabelecida em $6,85 \pm 0,10 \text{ g/cm}^3$, face ao valor elevado da densidade média das pastilhas.

Para que as especificações de altura e densidade fôsse observadas, foram realizadas medições cuidadosas antes e depois de feito o carregamento, conforme quadros de contrôlo reproduzidos nas tabelas IV e V. A complementação da altura da coluna para o valor especificado foi conseguida por meio de uma pastilha fabricada especialmente e cuja altura era pré-determinada pelo carregamento das pastilhas normais. Essas pastilhas especiais, de altura variável conforme a necessidade, tinham as mesmas especificações de densidade e de diâmetro das demais pastilhas e foram produzidas pelo mesmo processo.

Para evitar que as pastilhas terminais pudessem ser partidas pela inserção da tampa para o fechamento do tubo, e também para evitar que ficassem com folga longitudinal, que poderia igualmente causar ruptura de pastilhas em operações de manipulação dos elementos combustíveis ou em seu transporte, foram colocados dois calços de borracha, ajustados em sua altura de forma a garantir estado de compressão da coluna, mas evitando a possibilidade de ruptura das pastilhas. Nos elementos combustíveis "especiais" os referidos calços foram empregados nas duas secções. Uma vez colocados os calços, eram os tubos recartilhados, como descrito na secção anterior.

mais e "especiais", e nas figuras 13 e 14 os histogramas referentes à altura da coluna de UO_2 e à densidade da coluna de pastilhas dos elementos normais. Conforme mostram êsses histogramas, apenas 2 dos 258 elementos combustíveis normais apresentaram altura fora dos limites especificados e dois apresentaram densidade média de coluna também fora dos limites; não foram contudo rejeitados ou modificados em seu carregamento por apresentarem desvio favorável. Durante as operações de carregamento, apenas três tubos, que apresentaram densidade de coluna menor que a especificada, tiveram de ser recarregadas, empregando pastilhas de densidade ligeiramente mais elevada.

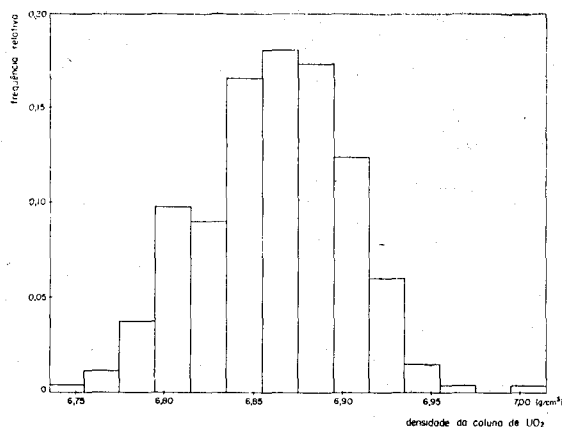


Fig. 14 — Histograma da distribuição dos valores da densidade da coluna de pastilhas de UO_2 nos elementos combustíveis normais.

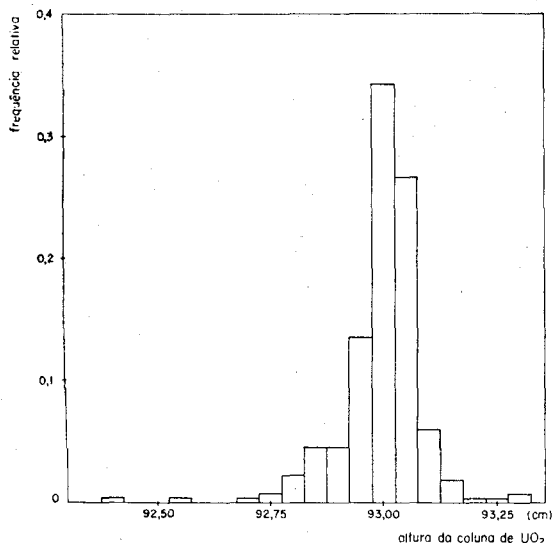


Fig. 13 — Histograma da distribuição dos valores da altura da coluna de pastilhas de UO_2 nos elementos combustíveis normais.

TABELA VI — Média e desvio-padrão dos dados característicos dos elementos combustíveis normais e especiais

Características	Elementos combustíveis normais	Elementos combustíveis especiais
Massa total, g ...	$9.376,8 \pm 49,9$	$8.762,0 \pm 5,0$
Massa de UO_2 , g .	$8.100,6 \pm 50,6$	$7.157,2 \pm 14,1$
Massa de alumínio, g	$1.267,4 \pm 74,5$	$1.686,4 \pm 5,1$
Massa calços de borracha, g	$8,832 \pm 0,599$	$18,871 \pm 0,980$
Altura da coluna de UO_2 , cm	$93,00 \pm 0,09$	$80,12 \pm 0,12$
Relação U/Al	$5,631 \pm 0,055$	$3,690 \pm 0,014$
Densidade média da coluna de UO_2 , g/cm^3	$6,86 \pm 0,04$	$6,94 \pm 0,01$

Na tabela VI figuram os valores médios e os respectivos desvios-padrão dos dados característicos dos lotes de elementos combustíveis nor-

A tabela VII reúne os dados principais referentes a 15 elementos normais, figurando também os valores dos erros. Mostram êsses dados a uniformidade dos valores obtidos e o pequeno erro da determinação da densidade e da medida da altura da coluna de UO_2 .

TABELA VII

IEA-DMN

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS DO "RE-SUCO"								
DESIGNAÇÃO	Massa total (g)	Massa UO ₂ (g)	Massa Al (g)	Massa dos calços de borracha (g)	Altura da coluna UO ₂ (cm)	Massa U contido (g)	Relação U/Al	Densidade média do UO ₂ (g/cm ³)
IEA-DMN-211	9.433,0 ± 5,0	8.149,1 ± 10,0	1.275,2 ± 11,0	9,123 ± 0,001	93,01 ± 0,05	7.179,4 ± 10,0	5,632 ± 0,005	6,90 ± 0,01
IEA-DMN-212	9.355,0 ± 5,0	8.097,0 ± 10,0	1.248,9 ± 11,0	9,100 ± 0,001	92,85 ± 0,05	7.133,5 ± 10,0	5,712 ± 0,005	6,87 ± 0,01
IEA-DMN-213	9.363,0 ± 5,0	8.101,1 ± 10,0	1.253,3 ± 11,0	8,578 ± 0,001	93,08 ± 0,05	7.137,1 ± 10,0	5,695 ± 0,005	6,86 ± 0,01
IEA-DMN-214	9.406,0 ± 5,0	8.139,1 ± 10,0	1.257,9 ± 11,0	8,985 ± 0,001	93,04 ± 0,05	7.170,5 ± 10,0	5,700 ± 0,005	6,90 ± 0,01
IEA-DMN-215	9.446,0 ± 5,0	8.158,0 ± 10,0	1.278,9 ± 11,0	9,061 ± 0,001	93,01 ± 0,05	7.180,2 ± 10,0	5,614 ± 0,005	6,91 ± 0,01
IEA-DMN-216	9.390,0 ± 5,0	8.115,9 ± 10,0	1.264,7 ± 11,0	9,379 ± 0,001	93,04 ± 0,05	7.150,1 ± 10,0	5,654 ± 0,005	6,87 ± 0,01
IEA-DMN-217	9.431,0 ± 5,0	8.153,1 ± 10,0	1.268,1 ± 11,0	9,781 ± 0,001	93,00 ± 0,05	7.182,9 ± 10,0	5,664 ± 0,005	6,91 ± 0,01
IEA-DMN-218	9.392,0 ± 5,0	8.105,8 ± 10,0	1.276,5 ± 11,0	9,752 ± 0,001	93,01 ± 0,05	7.141,2 ± 10,0	5,594 ± 0,005	6,87 ± 0,01
IEA-DMN-219	9.376,0 ± 5,0	8.098,8 ± 10,0	1.268,5 ± 11,0	8,752 ± 0,001	92,97 ± 0,05	7.135,0 ± 10,0	5,625 ± 0,005	6,86 ± 0,01
IEA-DMN-220	9.405,0 ± 5,0	8.123,3 ± 10,0	1.272,3 ± 11,0	9,361 ± 0,001	93,03 ± 0,05	7.156,6 ± 10,0	5,625 ± 0,005	6,88 ± 0,01
IEA-DMN-221	9.335,5 ± 5,0	8.042,9 ± 10,0	1.282,9 ± 11,0	9,678 ± 0,001	93,02 ± 0,05	7.085,8 ± 10,0	5,523 ± 0,005	6,81 ± 0,01
IEA-DMN-222	9.409,0 ± 5,0	8.127,2 ± 10,0	1.273,2 ± 11,0	8,589 ± 0,001	93,01 ± 0,05	7.160,1 ± 10,0	5,624 ± 0,005	6,88 ± 0,01
IEA-DMN-223	9.390,0 ± 5,0	8.115,2 ± 10,0	1.266,1 ± 11,0	8,720 ± 0,001	93,12 ± 0,05	7.149,5 ± 10,0	5,647 ± 0,005	6,86 ± 0,01
IEA-DMN-224	9.409,0 ± 5,0	8.123,9 ± 10,0	1.276,0 ± 11,0	9,090 ± 0,001	93,03 ± 0,05	7.157,2 ± 10,0	5,609 ± 0,005	6,88 ± 0,01
IEA-DMN-225	9.425,0 ± 5,0	8.150,1 ± 10,0	1.265,9 ± 11,0	9,050 ± 0,001	93,05 ± 0,05	7.180,2 ± 10,0	5,672 ± 0,005	6,90 ± 0,01

Uma amostra constituída por 10% do número total de elementos combustíveis normais foi estudada conforme feito na tabela V, objetivando determinar: a) a diferença da altura da coluna de UO₂ no elemento combustível para a soma das alturas das pastilhas constituintes do carregamento; b) diferença da massa da coluna para a soma das massas das pastilhas; c) diferença da densidade média da coluna para a média das densidades das pastilhas. Os resultados dessa análise constam da tabela VIII. Desses resultados depreende-se que a diferença das alturas corresponde a soma dos espaçamentos entre as pastilhas, indicando que esse espaçamento médio é de $(8 \pm 1) \cdot 10^{-2}$ mm. A diferença de massa, de 0,17%, é devida ao manuseio das pastilhas durante o carregamento e ao encaixe das mesmas dentro do tubo de alumínio. Não houve, contudo, qualquer perda de massa, uma vez que o material desagregado das pasti-

TABELA VIII — Diferenças de altura, de massa e de densidade para os elementos combustíveis controlados (cf. tabela V)

Características	Valor absoluto	Valor porcentual
Diferença de altura	0,205 ± 0,054 cm	-0,22
Diferença de massa de UO ₂	14,16 ± 1,97 g	+0,17
Diferença de densidade .	0,027 ± 0,009 g/cm ³	6,8'0+

lhas foi recolhido em recipientes apropriados e posteriormente reaproveitado. Finalmente, a diferença das densidades resulta das duas diferenças antes indicadas.

A carga total dos elementos combustíveis, normais e especiais, consta da tabela IX, na qual foram também reunidos todos os dados principais referentes aos 266 elementos combustíveis produzidos.

Conforme foi dito na Introdução, o "RE-SUCO" permite dois arranjos distintos, conforme se trabalhe com fonte de nêutrons (α, n), posição axial ou com feixe criado por acelerador Van de Graaff. Os dados referentes aos elementos empregados num e noutro caso foram englobados na tabela X.

3.11 — TRATAMENTOS FINAIS DOS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS — Após o fechamento e a operação de recartilhamento do tubo sobre a tampa superior, os elementos combustíveis foram submetidos a polimento mecânico e, a seguir, receberam aplicação de araldite na região do recartilhamento superior e, por fim, o tratamento de alodização. Depois do polimento mecânico, realizado com abrasivos e destinado a garantir superfície adequada para os tratamentos subsequentes, em tôdas as operações os tubos eram sempre manipulados com o uso de luvas de feltro ou de borracha, evitando-se daí por diante qualquer contato manual direto.

O recobrimento de araldite foi realizado como garantia suplementar contra eventuais va-

TABELA IX — Dados globais referentes à carga de elementos combustíveis normais e especiais

C A R A C T E R Í S T I C A S	Elementos combustíveis normais	Elementos combustíveis especiais	T O T A L
Número de elementos	258	8	266
Número de pastilhas normais	6.707	181	6.888
Número de pastilhas especiais	253	8	261
Massa total	2.419,2 ± 0,1 kg	70,10 ± 0,01 kg	2.489,3 ± 0,1 kg
Massa de UO ₂	2.090,0 ± 0,2 kg	56,46 ± 0,04 kg	2.146,5 ± 0,2 kg
Massa de alumínio	327,0 ± 0,2 kg	13,49 ± 0,05 kg	340,5 ± 0,2 kg
Massa dos calços de borracha	2.278,61 ± 0,02 g	147,768 ± 0,003 kg	2.426,38 ± 0,02 g
Altura da coluna de UO ₂	239,93 ± 0,01 m	6,410 ± 0,002 m	246,34 ± 0,01 m
Massa de urânio contido	1.841,4 ± 0,2 kg	49,77 ± 0,04 kg	1.891,2 ± 0,2 kg

TABELA X — Dados globais referentes às cargas do RE-SUCO, com fonte central ou com Van de Graaff

C A R A C T E R Í S T I C A S	Fonte central (α, n)	Van de Graaff
Número de elementos combustíveis normais	258	256
Número de elementos combustíveis especiais	6	8
Massa total	2.471,7 ± 0,1 kg	2.470,5 ± 0,1 kg
Massa de UO ₂	2.132,1 ± 0,2 kg	2.130,3 ± 0,2 kg
Massa de alumínio	337,1 ± 0,2 kg	337,9 ± 0,2 kg
Massa dos calços de borracha	2.389,44 ± 0,02 g	2.408,72 ± 0,02 g
Altura da coluna de UO ₂	244,74 ± 0,01 m	244,48 ± 0,01 m
Massa de urânio contido	1.885,0 ± 0,2 kg	1.877,0 ± 0,2 kg
Relação U/Al	5,592 ± 0,001	5,555 ± 0,001
Densidade média da carga de UO ₂	6,863 ± 0,001 g/cm ³	6,865 ± 0,001 g/cm ³

zamentos na região de recartilhamento superior, em virtude das dificuldades que foram apontadas para a execução do ensaio de estanqueidade do elemento carregado. A deposição de araldite foi feita a temperatura controlada e de forma a se ter uma camada recobrendo toda a região de recartilhamento, de cerca de 3 mm de largura e de 1 mm de espessura.

Foram os tubos inspecionados com grande rigor na etapa de decapagem subsequente, a fim de observar eventuais defeitos que só então viessem a ser revelados. No decurso dos trabalhos foi encontrado um tubo com defeito bastante profundo, o que exigiu sua ulterior substituição.

O terceiro tratamento objetivou o aumento da resistência à corrosão do alumínio 1100 em água deionizada que é o meio moderador e re-

fletor utilizado no conjunto subcrítico. O processo dito de "alodização", desenvolvido pela "Amchen Products", dos Estados Unidos, consiste essencialmente em se produzir uma película resistente, tida como amorfa, e que se torna parte integrante do metal, resultante da reação com o "Alodine". Foi utilizado o produto "Alodine-1200" que, conforme os dados do fabricante, assegura a formação de película de cromatos amorfos de 1,5 a 9 mg/dm² (15 a 90 mg por pé quadrado). O tratamento foi preferido em virtude de garantir grande uniformidade e continuidade da película protetora e pela vantagem que apresenta sobre outros tratamentos de ser realizado à temperatura ambiente, necessária para evitar quaisquer dilatações na região recartilhada.

Para o tratamento dos 266 tubos foi construída pela Divisão de Metalurgia Nuclear uma instalação bastante simples, mas que permitiu o tratamento em condições de absoluto controle, com relativamente reduzida mão-de-obra.

A seqüência do tratamento era a seguinte: 1) limpeza com "Ridoline 34"; 2) lavagem em água corrente; 3) banho redutor com "Deoxidizer 6" em solução diluída de ácido nítrico; 4) lavagem em água corrente; 5) banho protetor com "Alodine 1200"; 6) lavagem em água corrente; 7) enxaguadura acidulada com "Deoxylyte 11" e, por fim, 8) secagem em câmara de ar quente.

A adoção do processo tal como descrito foi precedida da realização de extenso programa de ensaios para determinação da eficácia do tratamento e para acerto das variáveis de operação, tendo em vista os requisitos impostos aos elementos combustíveis. Os ensaios realizados em condições que puderam prever o comportamento da proteção, comprovaram os característicos desejados, evidenciando apenas a perda da coloração amarela, característica resultante de ulterior dissolução do cromato, formando uma película de alumina hidratada.

Em tôdas as fases do tratamento foram adotados controles estreitos das operações, principalmente os referentes às concentrações e tempos de permanência. Graças a êsses controles, os característicos de proteção dos elementos combustíveis foram mantidos com grande uniformidade, sendo rejeitado apenas um elemento, por defeito no tubo de alumínio.

Todos os elementos combustíveis tiveram marcadas nas superfícies laterais superiores as inscrições de identificação "IEA-DMN" seguidas do algarismo correspondente a cada um dos 266 elementos produzidos.

*

A realização de um extenso programa de trabalhos de pesquisa tecnológica, de desenvolvimento e de fabricação de quase 2,5 t de elementos combustíveis acabados a partir de diuranato de amônio recebido, não teria sido possível sem o apoio e a colaboração franca e dedicada de todos quantos contribuíram para a efetivação, nos prazos previstos, do programa de fabricação dos elementos combustíveis do "RE-SUCO". Por isso, em primeiro lugar, destacam os autores o apoio e a compreensão que receberam do Prof. R. R. Pieroni, Diretor do Instituto de Energia Atômica, e a colaboração recebida do Prof. F. W. Lima, do Quím. K. J. Brill e do Licenciado A. Abrão, o primeiro Chefe da Divisão de Radioquímica e o segundo e terceiro, Chefes da Divisão de Engenharia Química, principalmente pela realização de numerosas análises químicas necessárias ao controle dos pro-

cessos. Destacam também o excelente desempenho dado pela Oficina Mecânica do I.E.A., sob a competente e dedicada direção do Sr. J. Ferreira, na execução de numerosos dispositivos e principalmente na fabricação de tôdas as peças de alumínio necessárias e para o fechamento dos elementos combustíveis.

Destacam, por fim, a colaboração dedicada e eficiente, muitas vezes realizada fora de horários e de dias de trabalho, pelos técnicos da Divisão de Metalurgia Nuclear que participaram de todos os trabalhos, a começar pelo Sr. Jorge Utimi, de saudosa memória e que colaborou com dedicação em todos os trabalhos, e dos Srs. Arioswaldo de Azevedo, Ronildo de Menezes, Domingos de Oliveira, Waldemar Corvello da Silva, Rubens Cima Pezzo e Aparecido Ferreira.

4. CONCLUSÕES

1. A calcinação realizada durante 3 horas a 875°C em fornos elétricos mostrou que o teor de SO₄ do U₃O₈ obtido podia ser baixado a menos de 100 ppm; para isso, o sal de pureza nuclear era carregado com a espessura de cerca de 30 mm, em bandejas de ferro fundido com 26-28% Cr.

2. A operação de redução do U₃O₈ a UO₂ não estequiométrico foi realizada em dois fornos elétricos tubulares, construídos especialmente para êsse fim, em atmosfera de hidrogênio, tendo sido de 400 e de 700°C, respectivamente, as temperaturas mantidas nas zonas de pré-redução e de redução. No gráfico da figura 2 mostrou-se a boa reprodutibilidade do valor da relação O/U das amostras de pó reduzido, cujo valor médio é 2,02.

3. As operações de condicionamento do UO₂ reduzido e de preparo das cargas foram descritas em detalhe; as adições feitas foram de 1,5% de cânfora, em solução alcoólica de 330 g/l, e de 0,5% de estearato de zinco. Essas operações asseguraram excelente compactabilidade das cargas, tendo o valor da densidade batida se mantido em $4,24 \pm 0,20$ g/cm³. Graças a êsse excelente índice é que puderam os autores obter pastilhas de elevada densidade sob pressões de compactação bastante baixas.

4. A compactação das pastilhas de $40,2 \pm 0,1$ mm de diâmetro e geralmente de 300 ± 6 g de UO₂ foi realizada em matrizes flutuantes em prensas hidráulicas de comando manual ou automático, tendo a pressão de compactação variado conforme os característicos das cargas entre 1,6 e 2,4 t/cm². As densidades obtidas no estado compactado deveriam estar compreendidas em $6,90 \pm 0,27$ g/cm³. Graças ao rígido controle de qualidade adotado (figs. 4, 5 e 6) os valores obtidos ficaram compreendidos em $6,966 \pm 0,068$ g/cm³,

5. A etapa de pré-sinterização visou, na realidade, apenas a destilação e a eliminação da cânfora e do lubrificante; foi realizada nos três fornos descritos, a 350°C, e assegurou, graças à atmosfera protetora de nitrogênio utilizada, quase total ausência de zonas oxidadas. As densidades médias das pastilhas ficaram em $6,886 \pm 0,055$ g/cm³, com flutuação bastante menor do que a especificada, graças ao estrito controle de qualidade adotado durante a fabricação (figs. 7, 8 e 9).

6. Os ensaios descritos sobre os conjuntos destinados a receber as pastilhas, fabricados no Instituto de Energia Atômica com alumínio 1100 de fabricação nacional, revelaram-se de grande valia para evitar quaisquer defeitos nesses conjuntos. Destaca-se, em particular, a grande vantagem propiciada pelo sistema adotado de recartilamento do tubo sobre as peças usinadas de barras, tendo revelado os ensaios posteriores que o fechamento era perfeito.

7. O carregamento dos tubos foi feito tendo em vista as especificações. Os histogramas das figuras 13 e 14 mostram que as tolerâncias de altura da coluna e de densidade foram observadas, sendo as flutuações bastante menores do que as permissíveis. As tabelas IV e V mostram os elementos de controle adotado e o cuidado tomado no desenvolvimento dos trabalhos de carregamento.

8. Finalmente, nas tabelas IX e X foram apresentados todos os dados, com os respectivos desvios-padrão, referentes aos 258 elementos combustíveis normais e aos 8 especiais, abrangendo ao todo 6.888 pastilhas normais e 261 pastilhas especiais, com massa total de $2146,5 \pm 0,2$ kg de UO₂. A densidade média final obtida em todos os elementos combustíveis, abrangendo um empilhamento total de $246,34 \pm 0,01$ m de pastilhas de UO₂, foi de $6,86 \pm 0,04$ g/cm³, dentro de especificação, mas com $0,16$ g/cm³ a mais que o valor médio previsto para os cálculos do reator.

9. Os primeiros resultados de funcionamento do "RE-SUCO", e que devem ser considerados como preliminares, mostraram que os valores calculados foram ultrapassados, tendo o valor de k_{ef} , medido para todo o carregamento, atingido 0,852. A melhoria desse característico em relação ao calculado é atribuída principalmente ao efeito refletor de nêutrons de determinadas zonas do conjunto subcrítico, não previsto nos cálculos. Trabalhos posteriores deverão elucidar devidamente essa questão, bem como o valor preciso de k_{ef} .

BIBLIOGRAFIA

1. SOUZA SANTOS, T. D., BIDWELL, R. M., HAYDT, H. M., FREITAS, C. T. e PEREIRA DA SILVA, P. S. C. — *Organização e realizações da Divisão de Metalurgia Nu-*

clear do Instituto de Energia Atômica. ABM-BOLETIM, vol. 19, nº 77, págs. 579-586, 1963.

2. PEREIRA DA SILVA, P. S. C., SOUZA SANTOS, T. D. e FREITAS, C. T. — *Contrôle dimensional de pastilhas de urânio para o reator "RE-SUCO".* ABM-BOLETIM, vol. 19, nº 85, págs. 759-770, 1964.
3. SOUZA SANTOS, T. D., BIDWELL, R. M., HAYDT, H. M., FREITAS, C. T. e PEREIRA DA SILVA, P. S. C. — *Estudo experimental das principais variáveis para o programa de produção de pastilhas de UO₂ para o reator subcrítico "RE-SUCO".* ABM-BOLETIM, vol. 19, nº 85, págs. 771-784, 1964.
4. SOUZA SANTOS, T. D., HAYDT, H. M. e FREITAS, C. T. — *Fabricação dos elementos combustíveis de UO₂ para o Conjunto Subcrítico "RE-SUCO".* METALURGIA, vol. 21, nº 88, págs. 217-222, 1965.
5. FRANZEN, H. R., FOSHINA, M. — *Cálculo da massa de óxido de urânio para o arranjo subcrítico "RE-SUCO" (a ser publicado).* IEA.
6. SOUZA SANTOS, T. D., HAYDT, H. M. e FREITAS, C. T. — *Developments in Fuel Fabrication for Research Reactors in Brazil.* Proceedings III Conferência Mundial Sobre Usos Pacíficos da Energia Atômica, vol. 10, págs. 26-29, New York, 1965.
7. BUSH, S. H. — *Aluminum and Its Alloys*, pág. 483 — *Reactor Handbook*, vol. 1, 2ª ed. — *Materials.* Interscience, New York, 1960.

DISCUSSÃO

MÁRIO RENNÓ GOMES (1) — Desejo, antes de mais nada, agradecer ao Eng.º Clauer Trench de Freitas a apresentação do trabalho, de grande valor, realizado pela equipe do Instituto de Energia Atômica, de São Paulo. Desejo também destacar as últimas palavras do Eng.º Clauer Freitas de que é uma realidade estupenda para nós, no Brasil, o fato de o Instituto de Energia Atômica estar habilitado a produzir esses reatores de pesquisa, a fim de que se possa incentivar essas pesquisas em várias regiões do País. Dessa forma poder-se-á contar, desde já e principalmente para futuro próximo, com um número de engenheiros e pesquisadores que, sem dúvida, irão desempenhar papel extraordinário no futuro, como já o representa no presente.

DANIEL VASSALLO (2) — Desejo saber qual era a distância livre entre o diâmetro da pastilha e o diâmetro do tubo. Queria saber se os senhores realizam alguma operação para estabelecer íntimo contato entre as pastilhas e o tubo. Não sei se, nesse caso, seria isso necessário, mas queria conhecer qual a distância livre entre a pastilha e o tubo.

CLAUER TRENCH DE FREITAS (3) — O intervalo é de 0,15 mm, uma vez que o diâmetro interno do tubo é de 40,5 mm e o diâmetro das pastilhas sintetizadas é de 40,2 mm.

D. VASSALLO — E há alguma operação para aumentar o contato?

C. T. FREITAS — Não. Aliás achamos isso des-

- (1) Conselheiro e Diretor da ABM; na presidência da Comissão. Professor Catedrático da Escola de Engenharia da UFMG; Belo Horizonte, MG.
- (2) Membro da ABM. Da Comisión Nacional de Energia Atômica; Buenos Aires, República Argentina.
- (3) Membro da ABM. Engenheiro da Divisão de Metalurgia Nuclear do IEA de São Paulo; São Paulo, SP.

necessário. Existe um estudo mexicano recente que demonstra ser conveniente um intervalo dessa mesma ordem de grandeza. Não foi, por isso, feita qualquer operação para diminuir esse espaço de ar.

JORGE E. KITTL⁽⁴⁾ — Queria somente observar que o óxido de urânio que se obtém na Comisión, na Argentina, não é estequiométrico. Isso melhora a sua sinterabilidade.

C. T. FREITAS — Aliás dei ênfase a esse aspecto. A relação O/U baixa não significa que o material cerâmico seja ideal para sinterização. Apenas valores muito elevados, superiores a 2,18 é que seriam contraindicados.

J. KITTL — Onde foi construído o forno que usaram para a redução do UO_2 ?

C. T. FREITAS — Todo o equipamento empregado para a fabricação dos elementos combustíveis do conjunto subcrítico "Re-Suco" foi construído em São Paulo. Esse é um dos pontos mais interessantes do processo empregado pelo Instituto de Energia Atômica: não utiliza equipamento que tivesse de ser importado do estrangeiro.

D. VASSALLO — Desejaria saber se não poderia dar outros detalhes sobre a vedação dos tubos de elementos combustíveis.

C. T. FREITAS — Creio que a solução utilizada pela Divisão de Metalurgia Nuclear foi bastante conveniente, sobretudo sob o ponto de vista econômico. Não utilizamos solda, embora tenhamos desenvolvido a tecnologia para seu emprego, se fôsse julgado preferível. Utilizamos, como mostramos no trabalho, o recartilhamento, operação realizada em torno, e que consiste em recalcar o alumínio do revestimento contra as peças terminais. Isso foi feito em duas operações, conforme talvez o senhor tenha podido notar na exposição feita. Em cada terminal há duas zonas recartilhadas, e o comportamento dos tubos, imersos no reator durante longo tempo, alguns meses, mostrou que o recartilhamento foi plenamente satisfatório, não tendo existido qualquer defeito nos elementos combustíveis fabricados.

J. KITTL — Queria fazer outra observação. A segunda carga do reator RA-1 da Argentina é também alodizada. É claro que é bastante mais crítica, porque os senhores têm parede de 2 mm e a outra é parede muito mais delgada. Minha outra pergunta é onde compraram os senhores o tubo de alumínio e quais os processos de controle de qualidade que adotaram para esse tubo, porque o que é comum é o tubo conter inclusões.

C. T. FREITAS — Sabemos que os senhores tiveram alguns problemas com o alumínio utilizado. Felizmente o alumínio que foi por nós encomendado à Companhia Brasileira de Alumínio não apresentou quais-

quer anomalias, tendo sido sua composição cotejada com a da especificação que fornecemos, as análises químicas tendo sido feitas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

J. KITLL — E quanto a outros ensaios?

HELITON MOTTA HAYDT⁽⁵⁾ — Durante a fabricação foram realizados vários ensaios, entre os quais ensaios de corrosão acelerada em corpos de prova alodizados.

JOSÉ DEODORO TRANI CAPOCCHI⁽⁶⁾ — Convém observar que o "Re-Suco" é um conjunto subcrítico, de maneira que nem todos os ensaios que são habitualmente realizados para elementos combustíveis de reatores críticos seriam indicados para o conjunto subcrítico.

PAULO GOMES DE PAULA LEITE⁽⁷⁾ — Corroborando sua opinião, acho que a inspeção deve ter em vista sempre alguma coisa, para não haver exageros.

Agora vou fazer uma pergunta ao Eng.^o Claur de Freitas. Como mencionou que a inspeção de estanqueidade do tubo se fez através do argônio ou do nitrogênio, se não me engano, e que é possível determinar vazamentos em fissuras ou furos de 20 microns de diâmetro, gostaria de saber como executou o furo para fazer o ensaio comparativo.

C. T. FREITAS — Na realidade foi apenas uma avaliação da ordem de grandeza. Pudemos constatar, aliás com alguma dificuldade, que essa ordem de grandeza estava correta, por observação microscópica.

P. G. PAULA LEITE — Não é o caso do "Re-Suco", mas por processos nucleares já se fazem ensaios de vazamento da ordem de 1 microlitro em 150 horas. É alguma coisa de extraordinariamente sensível.

Tenho pessoalmente tentado fazer a determinação de vazamento medindo diâmetros através da passagem de líquidos e de gases sob pressão. Gostaria de saber se isso foi também feito.

M. RENNÓ GOMES — Antes de encerrar a discussão do trabalho, farei uma pergunta que é desperdiçada pela qualidade do alumínio empregado. Os autores empregaram alumínio 1100, o que significa que o teor total das impurezas é da ordem de 1%. Isso tem importância?

H. M. HAYDT — Não, embora em energia nuclear haja a possibilidade de utilização de liga 8001, a qual foi desenvolvida no "Argonne National Laboratory" com melhores qualidades de resistência à corrosão em temperaturas mais elevadas.

(4) Membro da ABM; da Comisión Nacional de Energia Atômica; Buenos Aires, República Argentina.

(5) Membro da ABM. Engenheiro da Divisão de Metalurgia Nuclear do IEA de São Paulo; São Paulo, SP.

(6) Membro da ABM. Engenheiro da Divisão de Metalurgia Nuclear do IEA de São Paulo; São Paulo, SP.

(7) Membro da ABM e Professor; do Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro, GB.