

BRFEC 1084



"CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA FABRICAÇÃO DE PASTILHAS DE UO_2 "

**Nestor Fogaça Filho, Erberto Francisco Gentile
Marcelo Breda Mourão, Tharcisio D. de Souza Santos e
Heliton Motta Haydt.**

**PUBLICAÇÃO IEA 460
CMN 70**

JANEIRO/1977

"CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA FABRICAÇÃO DE PASTILHAS DE UO_2 "

**Nestor Fogaça Filho, Erberto Francisco Gentile
Marcelo Breda Mourão, Tharcisio D. de Souza Santos e
Heliton Motta Haydt.**

**COORDENADORIA DE METALURGIA NUCLEAR
(CMN)**

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

APROVADO PARA PUBLICAÇÃO EM JUNHO/1976

CONSELHO DELIBERATIVO

Eng^o Hécio Modesto da Costa
Eng^o Ivano Humbert Marchesi
Prof. Admer Cervellini
Prof. Sérgio Mascarenhas de Oliveira
Dr. Klaus Reinach
Dr. Roberto D'Utra Vaz

SUPERINTENDENTE

Prof. Dr. Rômulo Ribeiro Pieroni

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
Caixa Postal 11.049 (Pinheiros)
Cidade Universitária "Armando de Salles Oliveira"
SÃO PAULO - BRASIL

NOTA: Este trabalho foi conferido pelo autor depois de composto e sua redação está conforme o original, sem qualquer correção ou mudança.

"CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA FABRICAÇÃO DE PASTILHAS DE UO_2 "⁽¹⁾

Nestor Fogaça Filho⁽²⁾, Erberto Francisco Gentile⁽³⁾,
Marcelo Breda Mourão⁽⁴⁾, Tharciso D. de Souza Santos⁽⁵⁾ e
Heliton Motta Haydt⁽⁶⁾

RESUMO

Os autores procuram estabelecer uma série de comparações paramétricas, referentes a pós de UO_2 provenientes de duas origens distintas, ou seja, diuranato de amônio e tricarbonato de amônio e urânio fabricadas no Instituto de Energia Atômica.

É ressaltada a importância referente a facilidade de compactação dos pós, bem como necessidade de obtenção de microestrutura homogênea, tanto no que diz respeito a distribuição de poros, como no tamanho de grão.

A fim de estabelecer os parâmetros de comparação foram efetuados todos os ensaios recomendados para controle de produtos na linha de fabricação de elementos combustíveis para reatores nucleares de potência, destacando o ensaio de resinterização aplicado para observar a estabilização dimensional das pastilhas.

1 – INTRODUÇÃO

A Coordenadoria de Metalurgia Nuclear do Instituto de Energia Atômica vem dispendendo, nos últimos anos, um esforço enorme no sentido de acompanhar o desenvolvimento da tecnologia de fabricação de elementos combustíveis para reatores tipo PWR, de acordo com o programa nuclear brasileiro. Dentro desse objetivo a Coordenadoria vem realizando uma série de experiências na área de cerâmica nuclear, com a produção de pastilhas sinterizadas de óxidos de urânio a partir dos sais diuranato de amônio e tricarbonato de amônio e urânio nuclearmente puros, preparados pela Coordenadoria de Engenharia Química do mesmo Instituto.

O presente estudo de sinterabilidade de pós de UO_2 surgiu não só pela necessidade de se comparar pastilhas obtidas de diferentes pós entre si, mas também de confrontá-las com pastilhas produzidas no exterior, numa tentativa de determinar a linha mais adequada a ser adotada pela indústria nacional.

(1) Trabalho apresentado ao XXXI Congresso Anual da Associação Brasileira de Metais, Belo Horizonte, MG, de 04 a 10 de julho de 1976.

(2) Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Pesquisador Junior, Coordenadoria de Metalurgia Nuclear, Instituto de Energia Atômica, São Paulo, SP.

(3) Membro da ABM, Mestre em Engenharia (Engenharia Metalúrgica), Supervisor de agrupamento, Coordenadoria de Metalurgia Nuclear, Instituto de Energia Atômica.

(4) Membro da ABM, Engenheiro em Metalurgia, bolsista Coordenadoria de Metalurgia Nuclear, Instituto de Energia Atômica, São Paulo, SP.

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

(6) Membro da ABM, Doutor em Engenharia (Engenharia Metalúrgica), Coordenador de Área, Coordenadoria de Metalurgia Nuclear, IEA, SP.

2 – MATERIAIS E MÉTODOS

Para a produção das pastilhas de UO_2 , que devem seguir as especificações usadas para os reatores de potência tipo PWR ("pressurized water reactor") foram utilizadas matérias-primas provenientes de dois processos distintos, desenvolvidos pela Coordenadoria de Engenharia Química.

O primeiro deles é o diuranato de amônio (DUA), obtido naquela Coordenadoria⁽²⁾ de longa data, o qual tem sido largamente comentado nos trabalhos publicados pela CMN^(6,7).

O segundo sal, o tricarbonato de amônio e uranilo obtido mais recentemente naquela Coordenadoria, em escala de laboratório, tem cor amarelo-esverdeado, apresentando um caráter mais cristalino que o DUA.

As micrografias eletrônicas de varredura, figuras 1 e 2, apresentam com facilidade a diferença estrutural dos dois pós, realçando as formas cristalinas do UO_2 de ATCU.



Figura 1 – Micrografia eletrônica de UO_2 proveniente de DUA, obtida por microscopia eletrônica de varredura. Aumento: 1000 X

Deve-se chamar atenção para o fato de que mesmo durante o processamento posterior, até atingir-se o estágio de pó de UO_2 , as formas dos cristalitos e aglomerados são conservadas.

O UO_2 utilizado para a confecção das pastilhas é, então, preparado através de calcinação, seguida de redução, do diuranato de amônio (DUA) ou tricarbonato de amônio e uranilo (ATCU) nuclearmente puros. Esses UO_2 , obtidos na forma de pó, apresentam as propriedades características após o processamento metalúrgico conforme as tabelas I e II.

O processo⁽⁵⁾ empregado na preparação das pastilhas de UO_2 é idêntico para ambos os pós de UO_2 , ou seja: calcinação em forno de mufla, à temperatura entre 700 e 750°C por cerca de 10 h; redução do U_3O_8 a UO_2 , em forno de mufla, à 750°C por 30 minutos, através de hidrogênio; compactação do UO_2 em prensas manuais ou mecânicas de dupla ação; sinterização das pastilhas em

forno elétrico de mufla, com resistência de molibdênio, sob atmosfera de hidrogênio, à temperatura de 1675°C e intervalos de tempos variáveis desde 1 até 6 h; retificação das pastilhas para acerto do diâmetro final em retificas tipo "centerless"

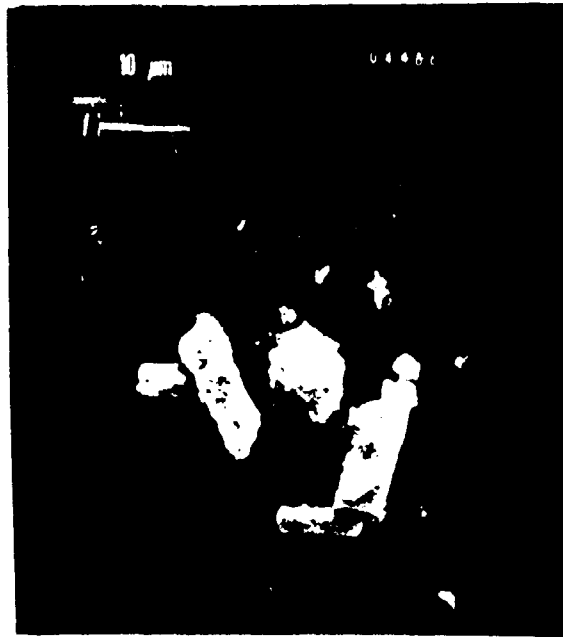


Figura 2 — Micrografia eletrônica de UO_2 proveniente de ATCU, por microscopia eletrônica de varredura Aumento. 1000 X

Paralelamente ao processo de fabricação das pastilhas de UO_2 existe uma série de controles, por meio de ensaios, com a finalidade de garantir que a qualidade do produto esteja dentro das estreitas especificações exigidas pela tecnologia de fabricação de elementos combustíveis nucleares.

Tabela I

Propriedades Características dos Pós

MATERIAL	Relação O/U	Densidade (g/cm^3)			Sup. Esp. BET (m^2/g)	Diâmetro Médio (μ)
		Solta	Batida	Limite		
UO_2 (DUA)	2,058	2,2	2,7	2,8	1,0	1,10
UO_2 (ATCU-2)	2,120	1,8	2,2	2,4	1,3	2,27
UO_2 (ATCU-3)	2,082	1,6	1,9	2,0	1,8	1,80

O controle normal nos pós de UO_2 é efetuado através de ensaios de densidades, relação O/U, superfície específica (processo BET) e diâmetro médio de partícula (método Fischer), além da análise granulométrica, efetuada por peneiramento e complementada pela balança de sedimentação. Esses ensaios seguem todo o processamento do pó até a confecção da pastilha, a qual sofre um novo controle de maneira a uniformizar o produto obtido na operação de compactação.

Tabela II
Distribuição Granulométrica dos Pós de UO_2

Classes Granulométricas (μ)	Porcentagem Retida (%)		
	UO_2 (DUA-N)	UO_2 (ATCU-2)	UO_2 (ATCU-3)
+ 149	0,9	8,0	0,3
- 149 + 105	7,0	9,0	10,0
- 105 + 74	15,1	13,0	24,0
- 74 + 53	24,8	13,7	19,0
- 53 + 44	6,2	5,1	6,0
- 44 + 11	10,5	11,8	16,0
- 11 + 8	8,5	18,2	5,5
- 8 + 6,5	5,5	6,6	3,0
- 6,5 + 5,6	3,7	3,7	1,5
- 5,6 + 4,5	2,4	2,9	2,0
- 4,5 + 3,2	7,9	4,3	1,6
- 3,2 + 2,6	1,9	1,5	1,0
- 2,6 + 2,3	2,4	1,5	0,6
- 2,3 + 2,0	3,0	0,7	0,5
TOTAL	100,0	100,0	100,0

Seguem-se, então, os ensaios necessários para qualificar o produto final, ou seja, a pastilha de UO_2 sinterizada. Normalmente os ensaios dessa fase são: densidade geométrica e hidrostática, ensaios dimensionais, determinação de porosidade aberta e fechada, umidade e ensaio de resinterização. O objetivo deste último é determinar qual o grau de estabilidade da microestrutura.

3 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Pode-se dividir os resultados obtidos através dos controles efetuados durante o processamento, em duas partes. A primeira ligada ao controle de fabricação da pastilha pelo método de prensagem, conforme exposto no item anterior e a segunda englobando os resultados referentes ao processo de sinterização e o controle do produto obtido.

Os característicos dos pós de UO_2 submetidos ao processo de compactação, apresentados na tabela I, mostram que dever-se ia esperar uma certa facilidade para compactar o pó de UO_2 proveniente do DUA em relação aos outros, provenientes do processo ATCU. Isto, devido a alta densidade solta do pó e ao diâmetro médio menor que os demais; com isto pode-se esperar menor retenção de ar entre as partículas do pó quando colocado na matriz para compactação e, portanto, maior compactabilidade do pó. Está claro que, para esta maior facilidade de compactação concorrem ainda a forma e distribuição granulométrica (tabela II). A forma apresentada pelos cristalitos dos pós, também favorece ao UO_2 .

proveniente do DUA, uma vez que tendo formas arredondadas e de tamanho menor em média, apresenta maior capacidade de acomodação durante a prensagem (Ver figuras 1 e 2).

Entretanto, os valores obtidos para a superfície específica (método BET), fazem com que se espere uma maior facilidade de sinterização para os pós obtidos pelo processo ATCU, destacando-se aí o UO_2 obtido do ATCU - 3, para o qual a superfície específica é quase o dobro da do obtido a partir do DUA.

A distribuição granulométrica apresentada na tabela II mostra uma maior quantidade de finos para o UO_2 proveniente do DUA, o que acaba refletindo numa maior compactabilidade desse material em relação aos outros. Deve se ressaltar, porém, que o UO_2 proveniente do ATCU - 2 deverá apresentar maior facilidade de compactação que o ATCU - 3 devido a maior quantidade de finos existentes no primeiro.

Esses três pós de UO_2 foram compactados pelo mesmo processo e os característicos das pastilhas cilíndricas obtidas estão apresentados na tabela III

Tabela III

Dados referentes a pastilhas de UO_2 a verde

Propried Mat.	Pressão Pré Compactação (t/cm ²)	Pressão Compactação (t/cm ²)	Altura Diâmetro	Densid solta (g/cm ³)	Densid. a verde (g/cm ³)	d_v/d_s
UO_2 (DUA-78)	-	0,9	1,5	2,2	4,96	2,25
	-	2,0	1,5	2,2	5,35	2,43
UO_2 (ATCU-2)	-	0,9	1,5	1,8	4,60	2,56
	0,95	2,0	1,5	2,1	5,42	2,61
UO_2 (ATCU-3)	-	0,9	1,5	1,6	4,48	2,80
	0,95 (*)	2,0	1,5	2,6	5,28	2,02

(*) Com adição de 0,5% de estearato de zinco, como lubrificante

Para melhor se comparar os resultados obtidos durante o controle de compactação, foram mantidos constantes as dimensões geométricas das pastilhas, ou seja, todo o estudo foi efetuado para pastilhas com uma relação altura/diâmetro constante e igual a 1,5. Isto para que os gradientes de esforços nas diversas pastilhas permaneça aproximadamente constante.

Durante a compactação observou-se uma série de peculiaridades inerentes ao processo, as quais mereceram amplas discussões em trabalho⁽³⁾ anteriormente apresentado por esta Coordenadoria

Observando-se a tabela III, vê-se que a previsão feita, quanto à compactabilidade dos pós, foi perfeitamente verificada, tendo-se as pastilhas de UO_2 a partir do DUA apresentado maiores densidades a verde; mesmo quando empregou-se a técnica de pré-compactação para os pós de UO_2 provenientes do processo ATCU. Deve se ressaltar que não havendo pré-compactação, é válido observar-se que para o UO_2 do DUA a relação entre densidade a verde (d_v) e densidade solta do pó (d_s) é mínima; o que corrobora com a idéia de facilidade de compactação⁽³⁾. A tabela III mostra, também, que quando a pré-compactação diminui a relação d_v/d_s , ela concorre no sentido de melhorar a compactabilidade dos

pós de UO_2 provenientes do ATCU Isto realmente ocorreu na prática, permitindo que a densidade a verde das pastilhas atingisse o intervalo de 5,0 a 6,0 g/cm^3 , faixa ideal para que as densidades requeridas para pastilhas sinterizadas sejam alcançadas. Estes valores não eram atingidos pelos pós de UO_2 (ATCU) antes da pré-compactação, posto que as pastilhas se apresentavam trincadas após a compactação direta, para pressões acima de 1.0 t/cm^2 .

Essas pastilhas compactadas foram, então, sinterizadas em um forno elétrico de mufla, a 1675°C sob atmosfera de hidrogênio (tipo C) e nitrogênio (tipo R) na relação de 9 para 1, respectivamente. A operação em si envolveu um consumo de 2 m^3/h de hidrogênio, sendo que a mesma foi efetuada numa campanha de 150 horas contínuas.

Todas as pastilhas foram sinterizadas a 1675°C, porém a diferentes tempos com o objetivo de observar-se a evolução da micro-estrutura durante o processo de sinterização.

A tabela IV apresenta uma série de dados obtidos pelos ensaios efetuados, durante o controle das pastilhas após a sinterização.

Tabela IV
Propriedade de Pastilhas de UO_2 Sinterizadas

Propr. Mater.	Dens a verde (g/cm^3)	Tempo de Sinter. (h)	h/ϕ	Densid Sinter. (g/cm^3) *	Porosidade Fechada (%)	Tamanho de grão (μm)	$\frac{\rho_s - \rho_v}{\rho_s}$
UO_2 (DUA)	4,96 5,35	3 4	1,5 1,5	9,96 10,04	$13,9 \pm 2,4$ $10,4 \pm 8,3$	$13,9 \pm 3,6$ $14,1 \pm 2,1$	0,50 0,47
UO_2 (ATCU-2)	4,60 5,42	3 1	1,5 1,5	9,66 10,12	— —	— —	0,52 0,46
UO_2 (ATCU-3)	4,48 5,28	3 1	1,5 1,5	9,97 10,17	$12,1 \pm 2,5$ $9,8 \pm 3,7$	$6,6 \pm 1,9$ $8,3 \pm 3,1$	0,55 0,48

(*) Densidade Geométrica

Nota-se, a primeira vista, que as pastilhas de UO_2 (ATCU) apresentaram densidades pouco superiores às do UO_2 (DUA) para tempos bem menores de sinterização, quando as mesmas foram submetidas a operação de pré-compactação devido, provavelmente, à diminuição da porosidade dos cristalitos, pela quebra dos mesmos. Esse fato é corroborado pela medida de porosidade fechada, efetuado por metalografia quantitativa⁽¹⁾, a qual apresenta-se bem inferior no caso do UO_2 (ATCU). As Figuras 3 e 4 mostram aspectos microestruturais de uma secção transversal de duas pastilhas de UO_2 , uma proveniente do DUA e a outra do ATCU - 3. Nestas observa-se que não existe grande diferença na porosidade apresentada, a não ser uma pequena heterogeneidade de distribuição da de UO_2 (DUA) em relação a do UO_2 (ATCU - 3). Pode-se observar, ainda, que os poros das pastilhas fabricadas a partir do UO_2 (DUA) são maiores e de formas mais irregulares apesar de serem mantidos por tempos iguais à temperatura de sinterização.

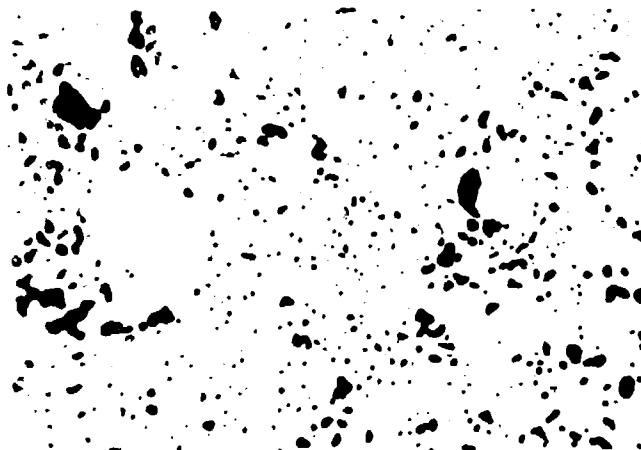


Figura 3 – Micrografia de secção transversal de pastilha de UO_2 (DUA), mostrando o aspecto de distribuição de porosidade. Pastilhas sinterizadas por 3 horas a $1675^\circ C$. Aumento: 500 X



Figura 4 – Micrografia de secção transversal de pastilha de UO_2 (ATCU), mostrando o aspecto de distribuição de porosidade. Pastilha sinterizada por 3 horas a $1675^\circ C$. Aumento: 500 X

A Figura 5 apresenta uma micrografia da secção transversal de uma pastilha de UO_2 (DUA) sinterizada por 4 h a $1675^\circ C$, a qual evidencia uma região de poros segregados, devido provavelmente a aglomerados não desfeitos durante a compactação. No caso da Figura 6, tenta-se mostrar que a pastilha de UO_2 (ATCU – 3) apesar de ser sinterizada a $1675^\circ C$ por apenas 1 hora tem uma melhor distribuição de poros na matriz, embora estes sejam de tamanhos maiores. Isso resultaria na possibilidade de atingir-se maiores densidades sinterizadas, apenas com maior tempo de sinterização, uma vez que esses poros apresentam-se com tamanhos e formas bem diversas e não arredondados.

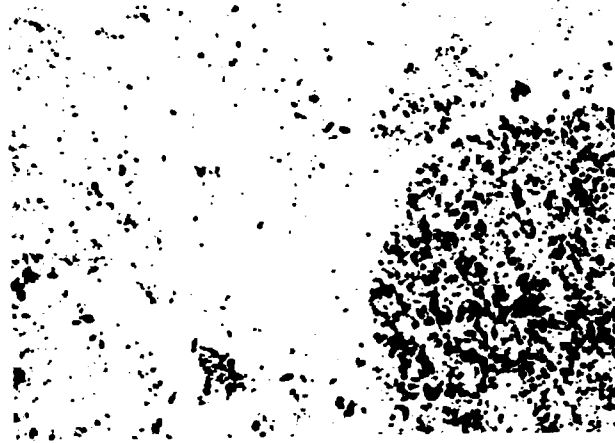


Figura 5 – Micrografia de secção transversal de pastilha de UO_2 (DUA), mostrando o aspecto de porosidade. Pastilha sinterizada por 4 horas a $1675^\circ C$. Aumento: 65 X

Quanto ao tamanho de grão obtido nas diferentes pastilhas, chega-se à conclusão de que o UO_2 (DUA) apresenta maior tamanho de grão que o do UO_2 (ATCU) para um mesmo tempo de sinterização e que para o mesmo pó quanto maior e o tempo de sinterização maior a homogeneidade de tamanho, isto é, menor a dispersão do valor médio obtido. Esse controle foi efetuado através de metalografia quantitativa automática, com a técnica desenvolvida na Coordenadoria⁽¹⁾. A tabela IV apresenta os valores obtidos para o tamanho de grão de pastilhas fabricadas com os diversos pós.



Figura 6 – Micrografia de secção transversal de pastilha de UO_2 (ATCU), mostrando o aspecto de distribuição de porosidade. Pastilha sinterizada por 1 hora a $1675^\circ C$. Aumento: 100 X

As micrografias das Figuras 7 e 8 mostram o aspecto do tamanho de grão de secções transversais de pastilhas sinterizadas, onde pode se observar a grande quantidade de poros existente, demonstrando que o processo de sinterização está ainda no seu segundo estágio, apesar das 3 horas usadas no mesmo.

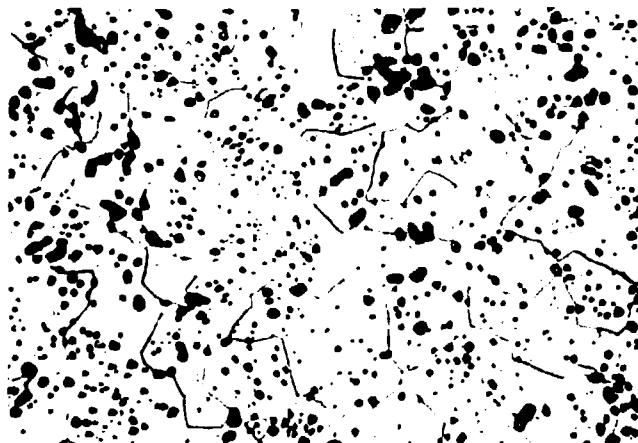


Figura 7 – Micrografia de secção transversal de pastilha de UO₂ (DUA), com aspecto do tamanho de grão. Pastilha sinterizada por 3 horas. Ataque: 10% HNO₃ – 90% H₂SO₄. Aumento: 500 X

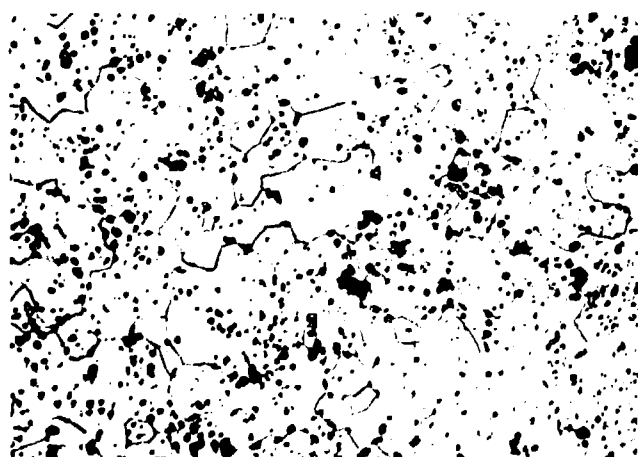


Figura 8 – Micrografia de secção transversal de pastilha de UO₂ (ATCU) em aspecto de tamanho de grão. Pastilha sinterizada por 3 horas. Ataque: 10% HNO₃ – 90% H₂SO₄. Aumento: 500 X

Essas pastilhas submetidas ao ensaio de resinterização, a 1700°C por 24 hs, sob atmosfera de hidrogênio, apresentaram características bem diversas, as quais podem ser observadas na tabela V

Pode-se depreender dos resultados obtidos que as pastilhas de UO₂ ATCU mostraram menor retração e dentro desse aspecto o UO₂ de ATCU – 3 foi o mais estável. Entretanto, o UO₂ (DUA) foi o que atingiu densidades maiores com menor pressão de compactação, evidenciando uma estabilização de microestrutura em altas densidades.

Tabela V

Características das Pastilhas Submetidas à Resinterização

Pressão Compactação (t/cm ²)	UO ₂ (DUA)			UO ₂ (ATCU-2)			UO ₂ (ATCU-3)		
	ρ_s (g/cm ³)	ρ_{rs} (g/cm ³)	$\Delta\rho$ (%)	ρ_s (g/cm ³)	ρ_{rs} (g/cm ³)	$\Delta\rho$ (%)	ρ_s (g/cm ³)	ρ_{rs} (g/cm ³)	$\Delta\rho$ (%)
1,4	9,87	10,37	5,1	10,07	10,43	3,5	10,12	10,26	1,4
2,0	10,12	10,42	3,8	10,12	10,41	2,9	10,18	10,35	1,7
2,3	10,19	10,46	3,6	10,19	10,43	2,4	10,18	10,38	1,8

4 – CONCLUSÕES

Os controles efetuados durante a fabricação das pastilhas, confeccionadas com pós de UO₂ de diversas origens, permitem concluir o seguinte:

- 1) Os pós de UO₂ provenientes do DUA apresentaram maior compactabilidade que os UO₂ (ATCU), sendo a diferença entre densidade solta do pó e densidade à verde da pastilha um bom índice de previsão desse comportamento, tendo como base uma só pressão de compactação.
- 2) Os ensaios de controle granulométrico dos pós mostraram que o UO₂ proveniente de DUA apresentou maior teor de finos; isto, provavelmente leva a uma maior densidade solta do pó e consequentemente, maior facilidade de compactação do mesmo.
- 3) Os pós UO₂ (ATCU) mostraram maior sinterabilidade que os provenientes do DUA, embora necessitassem de pré-compactação.
- 4) A microestrutura da pastilha de UO₂ (DUA) apresentou maior heterogeneidade na distribuição de poros nas pastilhas de UO₂ (DUA) resultaram maiores que o do UO₂ (ATCU) para igual tipo de sinterização.
- 5) A sinterização por tempos mais prolongados conduz a uma maior homogeneidade do tamanho de grão, isto é, o desvio padrão da média é diminuído.
- 6) O UO₂ (ATCU) apresentou-se mais estável, no ensaio de resinterização, porém o UO₂ (DUA) foi o que atingiu maiores densidades com menores pressões de compactação.

ABSTRACT

The authors try to establish a set of parametric comparisons related to UO₂ powders of two different origins as the ammonium diuranate and the ammonium uranyl carbonate prepared at the Instituto de Energia Atômica, São Paulo.

It is emphasized the importance due to the pressing capability of the powders and the requirement for homogeneous microstructure for both, the pore distribution and the grain size.

In order to establish the parameters of comparison, all the required normal tests for the in-process control of fabrication of fuel elements for nuclear power reactors were performed, particularly to the re-sintering test, in view of the evaluation of dimensional stability of the pellets.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BARCELOS, E. J. B. V. et alii. Metalografia quantitativa automática: algumas aplicações. [Trabalho apresentado ao 31º congresso anual da ABM, Belo Horizonte, 4 a 10 de julho, 1976].
2. FRANÇA JUNIOR, J. M. *Usina piloto de purificação de urânio pelo processo de colunas pulsadas em operação no Instituto de Energia Atômica*. São Paulo, Instituto de Energia Atômica, out. 1972. (IEA-277)
3. GALVÃO, C. R. et alii *Contribuição ao estudo da compactabilidade de pós de UO_2* . São Paulo, Instituto de Energia Atômica, (IEA-437).
4. HAYDT, H. M. et alii. Sinterización de dióxido de uranio: influencia de las características de los polvos. In: CENTRO REGIONAL DE AYUDA TÉCNICA, México, D. F. *Una vista interamericana, tecnología de materiales: 2ª conferencia interamericana em tecnologia de materiales, 24-27 agosto, 1970, México, D. F.* México, D. F., 1970. v.1, p. 199-209.
5. NISHIOKA, I. *Importância da caracterização de pós de UO_2 para a sinterização*. São Paulo, Instituto de Energia Atômica, jan. 1972. (IEA-259).
6. _____ et alii. *Nota preliminar sobre a caracterização de UO_2 para a fabricação de elementos combustíveis*. São Paulo, Instituto de Energia Atômica, nov. 1969. (IEA-194).
7. SOUZA SANTOS, T. D. et alii. Estado atual dos desenvolvimentos tecnológicos de combustíveis nucleares no Instituto de Energia Atômica. *Meturgia*, São Paulo, 27:791-800, 1971.

