

# ESTUDO EXPERIMENTAL DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS PARA A PRODUÇÃO DE PASTILHAS DE $UO_2$ PARA O REATOR SUB-CRÍTICO "RE-SUCO" <sup>(1)</sup>

THARCISIO D. DE SOUZA SANTOS <sup>(2)</sup>      RICHARD M. BIDWELL <sup>(3)</sup>  
CLAUER TRENCH DE FREITAS <sup>(4)</sup>      HELITON M. HAYDT <sup>(4)</sup>  
PAULO SERGIO C. PEREIRA DA SILVA <sup>(5)</sup>

## RESUMO

*A Divisão de Metalurgia Nuclear do Instituto de Energia Atômica realizou um extenso programa de estudos experimentais visando determinar a influência das principais variáveis que interessam ao programa de produção de cerca de 5.000 pastilhas de  $UO_2$ , de 40 mm de diâmetro, a serem empregadas na construção do reator sub-crítico "Re-Suco" que presentemente se acha em construção no Instituto de Energia Atômica. O programa foi estabelecido de forma a se poder projetar e construir instalação que, com o menor investimento e menores despesas de operação, pudesse fabricar as referidas pastilhas. Nesta contribuição são apresentados os resultados relativos a: 1) temperatura de calcinação do diuranato de amônio; 2) tempo e temperatura de redução sob hidrogênio, tanto de diuranato de amônio como de  $UO_3$ , obtido a diversas temperaturas; 3) condições de moagem do  $UO_2$  não-estequiométrico obtido; 4) correlação entre a densidade dos pós e sua compactabilidade; 5) influência de agentes aglomerantes sobre a compactabilidade; 6) pre-compactação, inclusive influência da pressão de pre-compactação; 7) sinterização, quanto aos efeitos de tempo e de temperatura; e 8) determinação das velocidades máximas de segurança no aquecimento e no resfriamento das pastilhas.*

- (1) Trabalho apresentado ao XVIII Congresso Anual da Associação Brasileira de Metais; C. T. n.º 540; Belo Horizonte, 15 a 20 de julho de 1963.
- (2) Membro da ABM; do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, presentemente com funções de Chefe da Divisão de Metalurgia Nuclear, Instituto de Energia Atômica, São Paulo.
- (3) Membro da ABM; Consultor da Agência Internacional de Energia Atômica junto à Comissão Nacional de Energia Nuclear, Divisão de Metalurgia Nuclear, Instituto de Energia Atômica, São Paulo. Do "Los Alamos Scientific Laboratory", Los Alamos, New Mexico, Estados Unidos.
- (4) Membro da ABM; Divisão de Metalurgia Nuclear, Instituto de Energia Atômica, São Paulo.
- (5) Membro da ABM; Divisão de Metalurgia, Instituto de Pesquisas Tecnológicas; anteriormente, na Divisão de Metalurgia Nuclear, Instituto de Energia Atômica, São Paulo.

## 1. INTRODUÇÃO

O reator sub-crítico de óxido de urânio "Re-Suco", atualmente em adiantado estado de construção no Instituto de Energia Atômica, utilizará pastilhas de  $UO_2$  de cerca de 40 mm de diâmetro confinadas em tubo de liga 1100 de alumínio.

Os cálculos de otimização efetuados pelos técnicos da Divisão de Engenharia de Reatores do IEA mostraram que o mínimo de massa de pastilhas corresponde à densidade de  $7,5 \text{ g/cm}^3$ . A fig. 1 mostra a influência da densidade das pastilhas sobre a massa total necessária de  $UO_2$ .

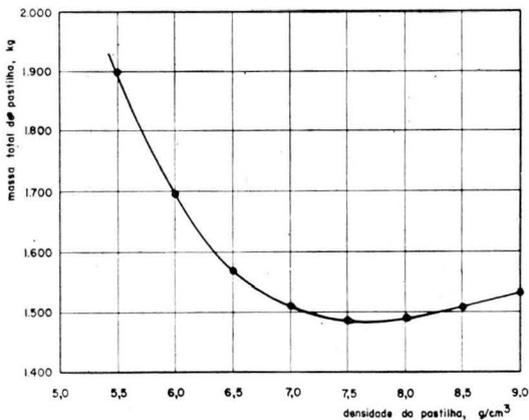


Fig. 1 — Resultados dos cálculos de otimização. Influência da densidade das pastilhas de 40,15 mm de diâmetro de  $UO_2$  sobre a massa total de  $UO_2$  necessária.

Tratava-se assim de estudar experimentalmente a influência das variáveis que permitissem a produção mais econômica, tanto do ponto de vista de investimento como de custo de produção, de cerca de  $1.550 \text{ kg}$  de pastilhas de  $6,0 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$  de densidade.

Dentre as diversas soluções que poderiam ser adotadas para a produção dessas pastilhas, dever-se-ia ainda preferir aquelas que não viessem a causar dificuldades especiais no reprocessamento ulterior do material. Nêsse sentido deveriam ser reduzidas ao mínimo as adições de aglomerantes e de outros agentes que contribuem para facilitar a sinterização, uma vez que os teores residuais desses agentes dificultariam de alguma maneira o tratamento posterior, quando êste vier a ser feito. Não obstante foram estudadas as influências de alguns aglomerantes sobre as propriedades das pastilhas não só para fins comparativos como

por constituir essa a técnica usualmente adotada em pastilhas sinterizadas a elevadas densidades.

Os estudos experimentais resumidos nesta contribuição foram realizados a partir de meados de 1962, inicialmente nas instalações da Divisão de Metalurgia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, e depois, nas da Divisão de Metalurgia Nuclear do Instituto de Energia Atômica, após terem sido projetadas, construídas e montadas as novas unidades, quase tôdas tendo em vista o programa de produção mencionado.

## 2. PROGRAMAÇÃO DOS ESTUDOS EXPERIMENTAIS

A matéria prima utilizada em todos os estudos adiante descritos é o diuranato de amônio, produzido no Instituto de Energia Atômica em instalação piloto, a partir de uranato de sódio decorrente do aproveitamento do urânio contido em monazita pela Orquima S.A. para a Comissão Nacional de Energia Nuclear. Esse diuranato de amônio é de elevada pureza nuclear, contendo entretanto proporções variáveis de sulfato, resultante das condições de precipitação.

O programa de estudos experimentais abrangeu as seguintes fases principais do processo de produção de pastilhas a partir daquele sal:

- a) estudo das condições de redução;
- b) condicionamento das misturas;
- c) caracterização das misturas do ponto de vista das suas propriedades de compactabilidade;
- d) estudo das condições de compactação, inclusive por meio de pre-compactação; e
- e) sinterização das pastilhas sob atmosfera de hidrogênio e de argônio, para a determinação das temperaturas e tempos de sinterização, bem como das velocidades máximas de aquecimento e de resfriamento das pastilhas.

No que se refere às condições de redução, interessava particularmente determinar previamente as condições de calcinação para dissociação do sulfato residual, visando não só baixar a concentração de  $H_2S$  nos gases do forno de redução como aumentar a densidade aparente do pó de  $UO_2$  não estequiométrico obtido. De outro lado, importava também contornar a grande piroforicidade constatada no  $UO_2$  obtido por redução direta do diuranato de amônio. Muito embora tenha sido desenvolvido método relativamente simples para controlar essa excessiva reatividade ao ar

do  $UO_2$  reduzido, julgou-se preferível abordar o problema para diminuir a importância e, possivelmente, eliminar essa etapa do processo.

O condicionamento da carga de  $UO_2$  para as operações subsequentes mostrou constituir uma das etapas mais importantes do processo, do ponto de vista de facilitar a compactação e a sinterização, reduzindo em consequência o custo de produção. Por essa razão, foi investigada cuidadosamente, tanto através do controle da granulometria inicial do  $UO_2$ , como por meio dos detalhes da moagem e mistura, da relação da carga de bolas para a carga de pó, ou da relação da carga de barras, como de tempo de mistura, como ainda quanto ao tipo do revestimento do moinho. Prestou-se particular atenção à reprodutibilidade dos resultados de condicionamento, naturalmente de grande importância para os resultados da compactação.

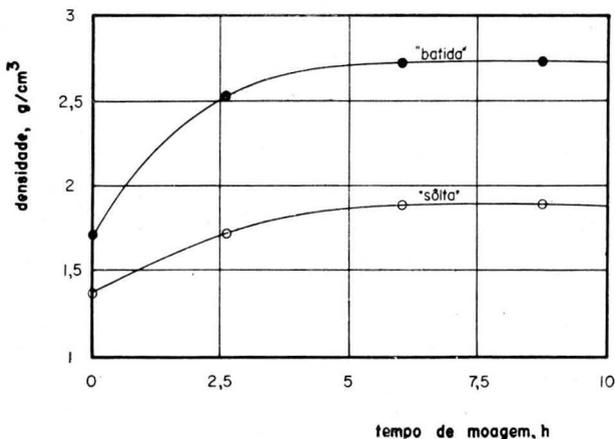


Fig. 2 — Influência do tempo de moagem sobre as densidades "sôlta" e "batida". Meio de moagem: barras de aço de 9,5 mm de diâmetro.

A caracterização das misturas do ponto de vista de seu comportamento quanto à sua compactabilidade constituiu difícil problema, uma vez que não se dispõe ainda no país de meios para a determinação experimental da superfície específica dos pós de  $UO_2$ , índice que, juntamente com o desvio da estequiometria, parecem constituir os melhores índices para julgar do comportamento de  $UO_2$  para fins cerâmicos, principalmente para pastilhas de elevada densidade. Mostraram os resultados obtidos que, na falta desses meios, os valores da densidade aparente da mistura condicionada, através dos índices "densidade sôlta", "densidade batida" e "densidade limite", constituíam meios bastante eficazes para caracterizar as cargas a serem compactadas.

As condições de compactação foram pormenorizadamente investigadas, estudando-se inicialmente a influência da geometria da matriz. Convém recordar aqui que quase todos os dados experimentais existentes na ampla literatura consultada, muitos dos quais indicados na extensa bibliografia revista por Wilkinson<sup>1</sup> e por Brill<sup>2</sup>, se referem a pastilhas de diâmetros pequenos, geralmente de 5 a 8 mm. Cêdo verificou-se que o aumento do diâmetro das pastilhas causava dificuldades novas nas pastilhas quanto a trincas depois da sinterização. Os estudos experimentais foram feitos inicialmente em matrizes para pastilhas de cêrca de 10 mm, depois de cêrca de 22 mm e finalmente nas matrizes de 40 mm de diâmetro. Desde o início dos estudos experimentais, tiveram os auto-

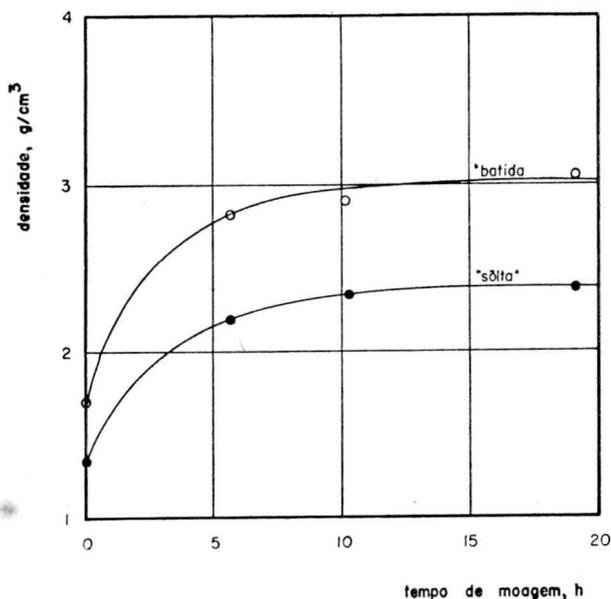


Fig. 3 — Influência do tempo de moagem sôbre as densidades "sôlta" e "batida". Meio de moagem: barras de aço de 19 mm de diâmetro. O pó utilizado é o mesmo do referente aos resultados da fig. 2.

res a preocupação de utilizar baixas pressões de compactação, o que contribui de forma acentuada para a economia do processo de fabricação das pastilhas, seja pela diminuição do investimento nas prensas, seja pela drástica redução do desgaste das matrizes. Estudaram também os autores pormenorizadamente as condições de pre-compactação, um dos meios eficazes para aumentar a compactabilidade dos pós.

Finalmente, as condições de sinterização (atmosfera, tempo, temperatura e velocidade de aquecimento e de resfriamento), pela sua importância, foram investigadas através de muitas dezenas de operações, nas quais se procuraram isolar a influência de cada uma das variáveis anteriores do processo. Constituído provavelmente a etapa mais onerosa do processo de fabricação de pastilhas, procurou-se orientar os estudos experimentais da sinterização no sentido de se simplificar ao máximo essa operação, para que não viesse constituir um gargalo nas operações ulteriores de produção das pastilhas para o reator "Re-Suco", seja em capacidade de produção, seja em custo de fabricação.

Para não alongar em demasia esta contribuição, os autores examinam: a seguir os principais estudos efetuados de acordo com o programa descrito em suas linhas gerais.

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

#### 3.1 — Redução a $UO_2$ não-estequiométrico

Visando baixar a menos de 2 ppm o teor de S residual no material reduzido e evitar a piroforicidade dos pós, a redução é feita a partir de cargas de  $U_3O_8$ , obtido este por dissociação do diuranato de amônio ao ar à temperatura de  $850^\circ C$ . A operação é realizada em fornos de mufla, a carga de diuranato de amônio sendo carregada em bandejas de aço inoxidável.

A redução é realizada em fornos tubulares dotados de duas zonas de controle independente de temperatura, sob atmosfera

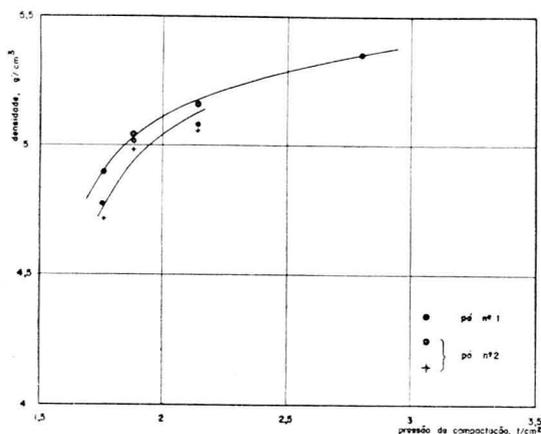


Fig. 4 — Influência da pressão de compactação e do pó sobre as densidades aparentes das pastilhas (estado compactado).

de hidrogênio. Para as cargas de 2 kg em botes de grafita de construção especial pela própria Divisão, a redução é obtida a 750°C permanecendo a carga durante 1 hora à essa temperatura.

Os estudos experimentais permitiram determinar a influência, para os pós de  $U_3O_8$  e para os de diuranato de amônio submetidos diretamente à redução, da temperatura sobre o valor do índice O/U, bem como sobre algumas das propriedades físicas dos pós de  $UO_2$  não-estequiométrico obtido.

A dissociação prévia do diuranato de amônio a  $U_3O_8$  realizada ao ar a 850°C permitiu não somente baixar aquém dos limites toleráveis a concentração de S como também eliminar a tendência de elevada piroforicidade dos pós obtidos a partir de diuranato de amônio.

### 3.2 — *Condicionamento e moagem do material reduzido*

A operação de moagem em moinhos metálicos ou com revestimento de borracha, empregando bolas de aço ou barras do mesmo material, visa simultaneamente reduzir a granulometria do pó na redução e condicionar a superfície dos grânulos para a operação subsequente de compactação.

A influência do meio de moagem sobre a densidade do pó foi estudada através de amostras de  $UO_2$  obtido por redução a 700°C durante uma hora, submetidas a moagem por tempos crescentes em dois moinhos metálicos idênticos, num dos quais se empregou barras de aço de 19 mm de diâmetro e no outro barras de 9,5 mm de diâmetro. Tôdas as barras tinham igual comprimento, de 119 mm, sendo também igual o valor da relação carga de pó/massa de barras de aço.

As figs. 2 e 3 reproduzem, respectivamente, os valores experimentais obtidos da densidade aparente "sôlta" e "batida" em função do tempo de moagem, para barras de 9,5 e de 19 mm de diâmetro. A maior superfície específica das barras menores (fig. 2) assegura andamento mais rápido da curva de condicionamento, mantidas constantes as demais variáveis. Noutras palavras, as barras de menor diâmetro permitem obter em tempos mais curtos de moagem os valores daqueles índices só obtidos com tempos mais longos quando o meio de moagem foi constituído por barras de 19 mm de diâmetro.

As barras de aço introduziram entretanto nível de Fe muito elevado, motivo pelo qual os estudos posteriores foram feitos sempre com carga de bolas de aço inoxidável de 8 a 12 mm de diâmetro.

Tendo sido constatado que, logo após iniciada a operação em moinhos metálicos não revestidos internamente, recobriam-se as bolas de película aderente de pós, procurou-se estudar a influência da remoção periódica dessa película sobre o andamento das curvas de densidade em função do tempo de moagem. Os resultados obtidos mostraram que, embora se possa economizar tempo de condicionamento com a remoção da citada película, cuja espessura aumenta gradativamente com o tempo, essa solução é bastante trabalhosa, podendo ainda causar perdas mecânicas de material. Por isso, os novos moinhos construídos foram dotados de revestimento de borracha, segundo projeto executado por um dos autores. Com tais moinhos, comprovou-se que a inversão periódica da posição do moinho sobre os rolos do aparelho conduzia a quase completa remoção da película sobre as bolas de aço inoxidável.

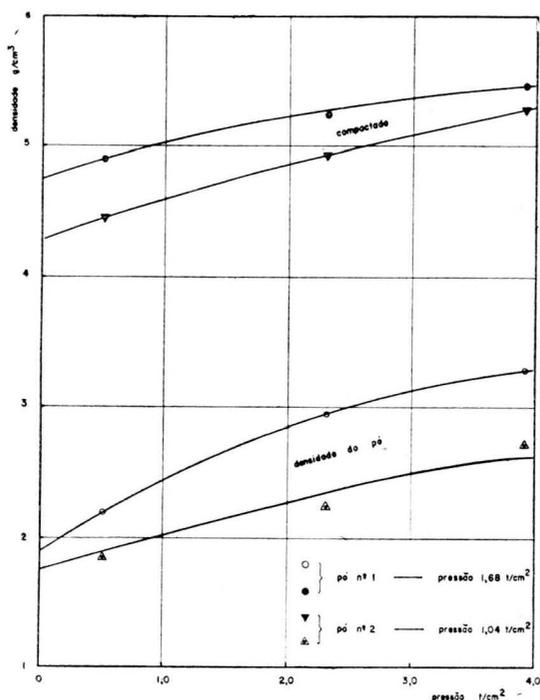


Fig. 5 — Influência da pressão de pré-compactação sobre a densidade de pastilhas obtidas sob as pressões constantes de 1,04 t/cm<sup>2</sup> (pó n.º 2) e de 1,68 t/cm<sup>2</sup> (pó n.º 1), respectivamente. Observar também a influência da pré-compactação sobre a densidade do pó.

### 3.3 — Correlação entre as densidades aparentes da carga condicionada e a densidade das pastilhas no estado compactado.

Na fig. 4 estão indicados os valores obtidos da densidade de pastilhas compactadas de cargas de pós de duas partidas diferentes, obtidos contudo à mesma temperatura de 700°C e a partir de diuranato de amônio, em função da pressão de compactação, na faixa entre 1,75 e 2,8 t/cm<sup>2</sup>. O pó n.º 1 foi condicionado de forma a desenvolver maior densidade aparente que o pó “2”, o que explica terem sido os valores obtidos para aquele pó sempre mais elevados que para este último.

Essa correlação é de importância prática, de vez que demonstrou que pós da mesma origem e produzidos nas mesmas condições mas de condicionamentos diferentes comportam-se diferentemente na compactação. Demonstraram ainda os resultados experimentais que pós condicionados de forma diferente poderiam ser compactados a uma dada densidade sob uma dada pressão, desde que fossem reduzidos de forma a terem diferentes densidades no estado solto.

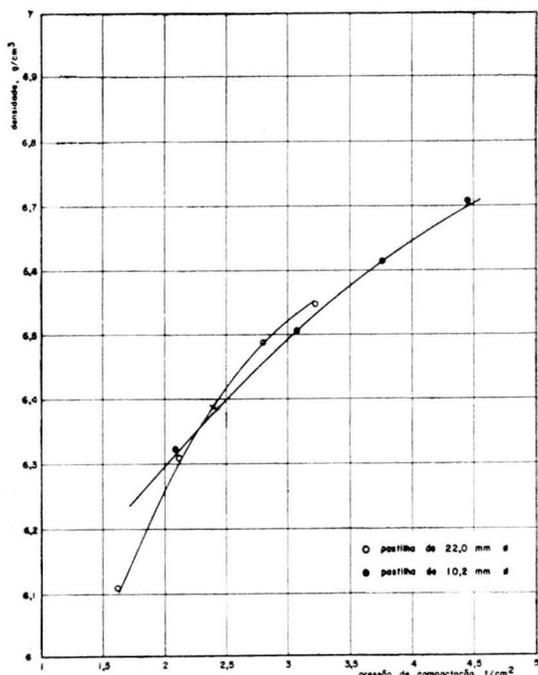


Fig. 6 — Influências do diâmetro da matriz e da pressão de compactação sobre as densidades (estado compactado) de pastilhas produzidas a partir de cargas com 2% de carbowax-4000.

3.4 — *Influência da pressão de pre-compactação*

A influência da pré-compactação sobre as propriedades dos pós foi estudada determinando-se as densidades dos pós em função da pressão de pré-compactação, tanto no estado moído como no estado não-moído, após posterior desintegração, e as densidades das pastilhas obtidas a partir desses pós, quando obtidas sob as pressões constantes de 1,04 e 1,68 t/cm<sup>2</sup>. Os valores obtidos foram representados na fig. 5.

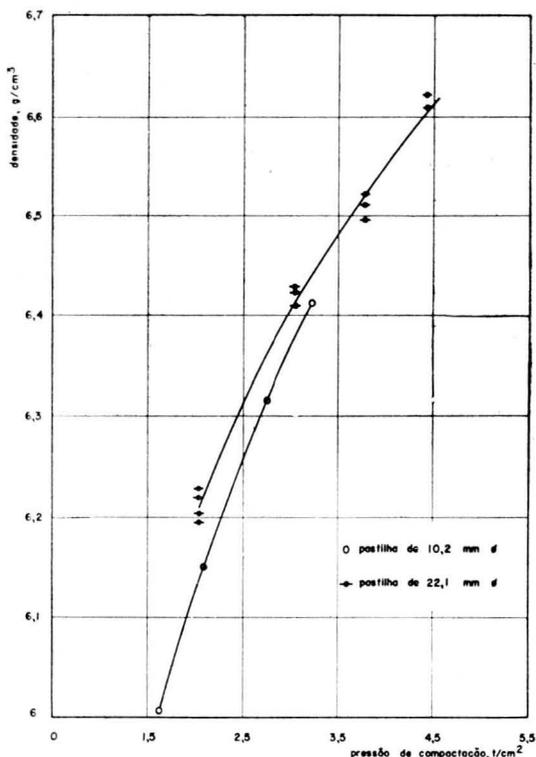


Fig. 7 — Influências do diâmetro da matriz e da pressão de compactação sobre as densidades (estado compactado) de pastilhas produzidas a partir de cargas com 2% de aglomerante "1031". O pó era o mesmo utilizado no preparo das cargas da fig. 6.

Nessa figura, todos os resultados se referem a pó obtido por redução direta do diuranato de amônio a 700°C, o pó 1 tendo sido moído e o 2 não. Mostram os resultados que a densidade aparente do pó aumenta com a pressão de compactação, o efeito sendo mais pronunciado com as pressões de pré-compactação relativa-

mente baixas. Para o "pó 1" a pré-compactação a  $3,92 \text{ t/cm}^2$  permitiu, por exemplo, elevar a densidade da pastilha de  $4,74$  a  $5,46 \text{ g/cm}^3$ , quando a pressão de compactação fôra apenas de  $1,68 \text{ t/cm}^2$ .

### 3.5 — *Influências da pressão de compactação, da dimensão da matriz e do aglomerante na densidade da pastilha no estado compactado*

Visando determinar a influência das dimensões da matriz e da pressão de compactação sobre a densidade no estado de compactado de pastilhas produzidas a partir de cargas condicionadas com 2% de carbowax 4000 (um dos agentes utilizados correntemente na produção de pastilhas de elevada densidade), foram realizados os ensaios cujos resultados estão reproduzidos na fig. 6. Os valores obtidos mostram a influência da pressão de compactação sobre a densidade de pastilhas obtidas em matrizes de 10,2 e de 22 mm de diâmetro.

A fig. 7 reproduz os resultados obtidos noutra série de experiências, nas quais, e nas mesmas matrizes, estudou-se a influência da pressão de compactação sobre a densidade de pastilhas produzidas agora a partir de cargas condicionadas com 2% de aglomerante "1031". Para êste aglomerante, as densidades das pastilhas de 22,1 mm de diâmetro são sempre maiores que as das pastilhas de 10,1 mm, quando é mantida constante a pressão de compactação. Embora os valores obtidos sejam muito bons, o aglomerante "1031" mostrou-se inferior ao "carbowax-4000", sendo sempre menores os valores das densidades das pastilhas obtidas com aquêle, mantidas constantes tôdas as demais variáveis.

### 3.6 — *Influência da pressão de compactação e do diâmetro da pastilha sobre a densidade, no estado compactado e no estado sinterizado, durante duas horas a $1000^\circ\text{C}$ sob hidrogênio.*

Convém lembrar aqui que, e conforme esclareceram os autores na introdução, o programa estabelecido visava a produção de pastilhas de  $6,6 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$  de densidade no estado sinterizado. Por êsse motivo, não estudaram nesta contribuição os autores a influência da temperatura e do tempo à temperatura sobre a densidade das pastilhas.

Na fig. 8 foram reproduzidos os resultados, obtidos experimentalmente, das densidades de pastilhas sinterizadas a  $1000^\circ\text{C}$  durante 2 horas sob hidrogênio, tanto as de 10 mm como as de 20 mm de diâmetro, em função da pressão de compactação (va-

riando esta entre 1,3 e 4,4 t/cm<sup>2</sup>). No mesmo gráfico foram também reproduzidos os valores das densidades das pastilhas no estado compactado.

Mostram os valores que os resultados obtidos nas matrizes de 20 mm foram sempre pouco melhores que os das matrizes de 10 mm. Mostram ainda que o aumento de densidade, traduzindo o "índice de sinterização" proposto em outra contribuição<sup>3</sup>, é tanto menor quanto maior a pressão de compactação, mantida constante a geometria da pastilha.

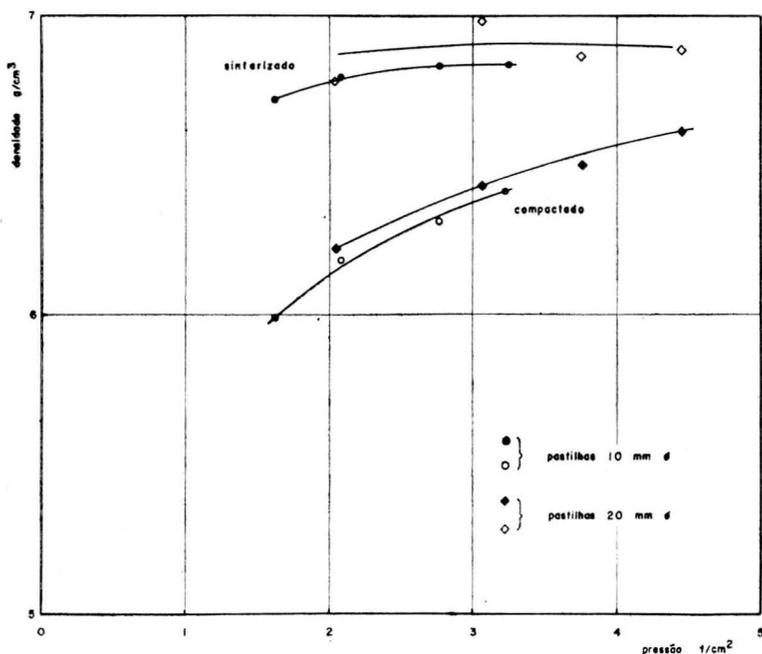


Fig. 8 — Influências da pressão de compactação e do diâmetro da matriz sobre a densidade das pastilhas sinterizadas a 1000°C durante 2 h sob hidrogênio. Representados também os valores das densidades das pastilhas no estado compactado.

### 3.7 — Influência das velocidades de aquecimento e de resfriamento sobre o aparecimento de trincas das pastilhas na sinterização

A sinterização das pastilhas de 40,15 mm de diâmetro ofereceu as dificuldades que foram antevistas através do estudo prévio do comportamento na sinterização das pastilhas de 22,1 mm de diâmetro. Essas dificuldades consistiam na grande suscetibilidade de trincarem, tanto no aquecimento como no resfriamento

até a temperatura ambiente. Os estudos experimentais permitiram determinar as melhores condições de temperatura de calcinação prévia, bem como as velocidades de aquecimento e de resfriamento que podiam ser empregadas sem risco de contribuir para a formação de trincas decorrentes das tensões devidas aos gradientes térmicos.

Com os valores obtidos têm sido produzidas centenas de pastilhas isentas de quaisquer defeitos. É de se notar, por fim, que as pastilhas necessárias ao reator "Re-Suco" são provavelmente as maiores já produzidas.

\*

Os autores manifestam seu agradecimento pela colaboração eficiente prestada pelo Cel. Paulo Lobo Peçanha, Diretor da Combustol Ltda., na construção dos fornos de redução e de sinterização, bem como de numerosos dispositivos auxiliares, e ao Sr. Peramo Ferri, Diretor da Mecânica de Precisão Apis Ltda. e à Brasinter S.A. respectivamente pela execução de matrizes prismáticas e para as pastilhas "Re-Suco".

#### 4. CONCLUSÕES

1. O programa de estudos experimentais descrito visou a produção de pastilhas de  $UO_2$  de 40,15 mm de diâmetro e de  $6,6 \pm 0,1$  g/cm<sup>3</sup> de densidade necessárias para o reator "Re-Suco" e a serem produzidas pela Divisão de Metalurgia Nuclear do Instituto de Energia Atômica dentro das melhores condições de investimento e de custo de produção. Todo o aparelhamento necessário foi obtido ou construído especialmente em São Paulo.

2. O controle da calcinação prévia do diuranato de amônio permitiu reduzir ao nível desejado a concentração de S no material reduzido e evitar a elevada piroforicidade que fôra constatada nos pós produzidos por redução direta do diuranato de amônio sob hidrogênio em baixas temperaturas.

3. A influência das variáveis do meio de moagem sobre a densidade dos pós foi determinada experimentalmente em função do tempo. A solução adotada foi a de esferas de aço inoxidável, a fim de evitar a contaminação no produto condicionado.

4. Foi estabelecida a correlação entre as densidades aparentes da carga condicionada, através das densidades "sôlta" e "batida" e a densidade das pastilhas no estado compactado, em função da pressão de compactação. Foi estabelecida, igualmente, a influência da pressão de compactação.

5. As influências da pressão de compactação, do diâmetro da matriz e da natureza do aglomerante (“carb Wax-4000” e “1031”) foram estabelecidas para as pastilhas no estado compactado.

6. Foram também estabelecidas as influências do diâmetro da matriz e da pressão de compactação sobre as densidades de pastilhas sinterizadas em condições estabelecidas, durante duas horas a 1000°C e sob atmosfera de hidrogênio.

7. Foram, por fim, determinadas as maiores velocidades de aquecimento e de resfriamento das pastilhas no forno que não determinam trincas devidas a tensões dos gradientes térmicos.

## REFERÊNCIAS

1. WILKINSON, W. D. — *Combustíveis Cerâmicos e Grafita*. CNEN-1-EN. Rio de Janeiro, 1961.
2. BRIL, S. — *Óxidos Cerâmicos*. *Selecta Chimica*, v. 20, pg 19-88, 1961.
3. 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*. Trabalho apresentado ao XVIII Congresso Anual da ABM. Neste Boletim, pág. 759.



**PROFUSA** - PRODUTOS PARA FUNDIÇÃO S/A

Fábrica: Avenida Nossa Senhora do Ó, 1842 — Fones: 62-9349 - 62-4186  
62-2786 — Caixa Postal, 11905 — End. tel. “PROFUSA” — São Paulo

### PRODUTOS GERAIS PARA FUNDIÇÃO

<b>FLUXOS:</b>	Alumínio	Cobre	Chumbo	Prata
	Bronze	Zinco	Ferro	Antimônio
	Latão	Zamac	Aço	Etc.

**Colas** para machos.

**Cimentos refratários.**

**Smooth-on** — cimento para ferro.

**Licopódios** para aparte modelo de alumínio-molde.

**Óleos sintéticos** centrifugados para machos.

**Cadinhos de grafite** — procedência alemã.

**Tintas** para machos, moldes, coquilhas e lingoteiras.

**Liquid-Parting** para aparte modelo de alumínio-molde.

**Refratários** — linha completa de tijolos, bicas, tampas, etc.

**Emulsões** — misto de farinha e óleos para adição às areias de machos.

**Produtos especiais** e para casos específicos nas fundições de qualquer metal.  
**Betonitas** nacionais e estrangeiras. Representação exclusiva para o Brasil da betonita sódica argentina — marcas Rotorgel ou Glutinol.

## ALGUNS ASPECTOS DA OPERAÇÃO DOS FORNOS ELÉTRICOS DE REDUÇÃO (\*)

### DISCUSSÃO

**E. Gudbrand Tandberg** <sup>(1)</sup> — (em inglês) — Desejo tocar num ponto que é de alto interesse para o Brasil: quero saber qual será o limite razoável para fornos de baixa redução a carvão vegetal. Minha idéia é de que deve andar por volta de 50 a 60% de carvão vegetal; em fornos abertos não haverá problemas, usando-se até 100% de carvão vegetal. Quanto aos fornos fechados, indago qual será o limite para se usar o carvão vegetal.

Desejo frisar que quando se formam essas crostas cai carvão vegetal dentro do poço e isso provoca explosões e danos aos eletrodos.

**M. F. Alvim Machado** <sup>(2)</sup> — Quanto ao uso de maior ou menor porcentagem de carvão vegetal no baixo forno de eletro-redução, de abóboda, o maior problema é o do pó. Para corrigir o inconveniente, estamos utilizando uma hematita ou canga com pequena porcentagem de pó, para utilizar mais carvão vegetal na carga. Outra questão importante é a da umidade. O carvão vegetal, devido à alta higroscopicidade, traz variações para o teor de carbono fixo da carga.

Todo o nosso carvão é produzido por nós mesmos. Mas, às vezes, utilizamos um carvão seco, no dia seguinte um carvão com 10% de umidade e no outro dia, um carvão com 20% de umidade. Essa variação no peso do carbono fixo, devido a variações da umidade, acarreta dificuldades na marcha do forno. Se há falta de carbono na carga formam-se crostas em torno dos eletrodos.

A única solução para este problema é parar o forno e jogar carvão ao redor dos eletrodos. Se a falta é passageira, a própria carga se encarrega de eliminar o problema.

Quanto ao forno ter ou não abóboda podemos dizer: Se o forno não tem abóboda e dá um sopro, há apenas um problema relativo, que não afeta a produção do forno. Mas se é de abóboda fechada, isso pode danificá-la e ocasionar acidentes pessoais. Procuramos evitar que isso ocorra usando uma porcentagem de carvão vegetal na carga, relacionada com as porcentagens de pó dos outros elementos da carga.

**H. Kleinheisterkamp** <sup>(3)</sup> — Qual a porcentagem máxima atingida em condições normais, com carvão normalmente seco?

(\*) C.T. n.º 527, publicada em ABM-Boletim, vol. 20, pág. 451.

(1) Engenheiro. Conferencista convidado da Elektrokemisk A/S de Oslo, Noruega.

(2) Membro da ABM; Eng. da Cia. Aços Especiais Itabira "ACESITA"; Acesita, MG. Autor do trabalho em discussão.

(3) Membro da ABM; Engenheiro metalurgista e Diretor Industrial da Usina do Barreiro da Cia. Siderúrgica Mannesmann; Belo Horizonte, MG.

**M. F. Alvim Machado** — Foi a essa pergunta que tentei responder, dizendo que a porcentagem de carvão vegetal vai depender não só da sua umidade, como da porcentagem de pó existente nos outros elementos da carga e no próprio carvão.

Quando trabalho com carga muito pura e um carvão de umidade baixa e constante, não tenho problemas.

**H. Kleinheisterkamp** — O pó é o elemento mais perigoso para o forno. No seu trabalho, entretanto, o Sr. falou em 5%. Depois mencionou 10% como sendo o usual. Entretanto, considere que tenha condições quase perfeitas, numa época seca: minério bem classificado, carvão bem seco, etc. Qual será a porcentagem máxima tolerável, apropriada?

**M. F. Alvim Machado** — É uma pergunta difícil de responder, porque não temos experiência com condições tão favoráveis assim. Temos feito várias tentativas, mas, acontece que compramos materiais de origens diversas; se durante uma semana o forno funciona muito bem e coloco 100% de carvão vegetal, na outra semana pode o material não estar dentro das condições mínimas.

**B. Cerne** <sup>(4)</sup> — Se tivermos uma carga muito bem preparada, como citou o autor, podemos andar com 100% de carvão vegetal. Mas como isso não é o caso, estamos sempre entre 60 e 80%.

**E. Gudbrand Tandberg** (em inglês) — É muito interessante quando o Sr. não tem pó e a umidade é mínima. Considerando esses pontos, lembro que existe também a idéia de que debaixo da ponta do eletrodo é necessário uma camada de coque reativo.

**M. F. Alvim Machado** — Por que o Sr. considera que é necessária uma camada de coque reativo? Por que não, uma camada de carvão vegetal, cuja reatividade é maior do que a do coque?

**Martinho Prado Uchôa** <sup>(5)</sup> — A propósito, queria trazer a seguinte contribuição: os fornos que trabalharam em Ribeirão Preto, entre 1924 e 1925, de propriedade da Cia. Eletro-Metalúrgica Brasileira, que foram os primeiros fornos elétricos operados no Brasil, eram do tipo «Eletromelt», com abóbada fechada e trabalhavam com recirculação de ar e 100% de carvão vegetal, e isso pela simples razão de que não havia coque no Brasil naquela época. É preciso que se diga que o minério era muito bem peneirado e o carvão vegetal também. Lembro-me que havia um enorme barracão de carvão, suficiente para um ano de consumo. O barracão era completamente fechado e o minério era guardado em silos. O carvão era peneirado e ia direto para o forno. Não sofria nenhuma operação de transbordo. E nunca houve explosões. (\*)

**M. F. Alvim Machado** — Se o carvão e o minério eram peneirados, e se havia um silo em que podia guardar o carvão um ano inteiro, não devia mesmo haver qualquer perigo. As condições eram ideais.

Quanto ao uso do carvão vegetal no forno de redução, tudo leva a crer que esse carvão seria o redutor ideal para forno elétrico devido à sua alta reatividade e grande pureza. É melhor do que o coque. Mas é preciso levar em conta que o carvão vegetal não dá uma granulometria perfeita, podendo haver segregações dentro da carga devido a essa falta

(4) Membro da ABM; Engenheiro da ACESITA; Acesita, MG.

(5) Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista Consultor; São Paulo, SP.

(\*) UCHOA, M. P. — "Eletro-metalúrgica brasileira. Usina de Ribeirão Preto, SP."; ABM-Boletim, volume 3, página 683.

de granulometria. Se quisermos uma granulometria rigorosa, teremos uma enorme perda em pó, porque devermos briar o carvão.

**H. Kleinheisterkamp** — Gostaria de agradecer essa sinopse de dados obtidos no forno da ACESITA. Esta discussão provavelmente vai continuar por vários anos, porque tivemos na Mannesmann a experiência de que, depois de cinco anos, talvez conheçamos as influências exatas do carvão vegetal; queria saber a granulometria completa da carga, porque tudo o mais dela depende; isso vai ajudar muito as discussões. Temos de concretizar os dados, e para isso deve-se recordar que a granulometria é um ponto essencial nos minérios finos.

O Sr. tem condições relativamente boas, com respeito à aparelhagem. Mas falou da quebra de eletrodos e da formação de crostas. Não seria possível, com uma rotação contínua e bem lenta, evitar a formação de crostas e evitar também as quebras de eletrodos? Nos fornos da Mannesmann, temos por ano, talvez duas ou três quebras de eletrodos, e isso sem rotação do cadinho. Esperamos que com o dispositivo rotatório vamos diminuir mais ainda a formação de crostas.

**M. F. Alvim Machado** — A diminuição da formação de crostas não depende da rotação do cadinho. A quebra, porém pode ser ocasionada pela formação de crostas. A formação é devida à falta de carbono na carga. E a única vantagem real que a rotação do cadinho traz é o desgaste uniforme do revestimento do forno. É claro também que ela desagrega a carga. Mas se qualquer carga que se usar não tiver a quantidade de carbono certa, haverá formação de crostas. Na rotação do forno, usamos duas a três velocidades, dependendo do material que se emprega. Quando a hematita sai bastante da granulometria que citei como ideal, então paro a rotação. Material de grandes dimensões, provoca a quebra de eletrodos. A velocidade mínima são 158 horas e a máxima, 15,8 horas para um giro de 360°. O forno, entretanto, não dá um giro de 360°. Ele tem uma oscilação de 86°.

**H. Kleinheisterkamp** — Mas qual a rotação que os Srs. aplicam? Esses são os limites. O sr. mencionou que só dá rotação ao cadinho quando tem uma potência no mínimo de 80%. Embora sem experiência quanto à rotação, acho que o cadinho deveria girar sempre, bem lentamente, provocando as vantagens que o Sr. mencionou.

**M. F. Alvim Machado** — Se com uma carga não muito bem preparada, ou com baixa potência girarmos o forno, haverá quebra de eletrodos. A velocidade mínima de giro do forno tem sido de 96 h/360°.

**H. Kleinheisterkamp** — Os Srs. já usaram a pasta brasileira «Saramenha» feita com piche de coque de Volta Redonda? Nós iniciamos em abril último, com uma experimentação longamente preparada, e até hoje não tivemos desvantagens com o uso da pasta «Saramenha». Pessoalmente, acho que podemos substituir até 100% a pasta importada, que é bem custosa, pela pasta que se produz no Brasil. Qual o seu consumo de pasta?

**M. F. Alvim Machado** — 10 kg por tonelada, para uma produção média diária de 100 toneladas.

**H. Kleinheisterkamp** — Felicito os Srs., pois sua usina não tem tantos problemas como parecia à primeira vista. Quanto a esse consumo de pasta, afirmo que a mistura dos redutores é de sua importância para a economia; conseguimos, em cifras médias do mês, baixar até 4 kg por toneladas o nosso consumo de pasta. Inclusive em eletrodos já trabalhamos com essa pasta «Saramenha».

**M. F. Alvim Machado** — Quando passamos a usar só coque no forno, nosso consumo de pasta baixou muito. Mas não temos esse consumo médio, porque passamos a utilizar mais carvão vegetal. Usando coque, a homogeneidade da carga é maior e o eletrodo fica numa região em que todo o ambiente é redutor. Com o carvão vegetal, não tenho esse benefício, porque além de ser muito mais leve, não tem uma granulometria certa, não fica misturado na carga e o consumo de eletrodos é maior.

**H. Kleinheisterkamp** — O forno da ACESITA tem uma relação bem interessante, e acho quase única, entre todos os fornos que conheço. É a relação entre o círculo primitivo dos eletrodos e o diâmetro do cadinho. O cadinho tem 8 m e o círculo primitivo tem 4 m. O sr. já tem uma idéia sôbre se essa é a relação favorável? Ou gostaria de mudar? Em outras palavras: no centro do forno se absorve muito calor; e indago se o Sr. gostaria de eliminar isso.

**M. F. Alvim Machado** — Como já disse no trabalho, no nosso forno o sistema de distribuição de carga é muito perfeito. É o tipo em que os materiais também entram no centro. Não gostaria de mudar isso, porque se assim o fizesse deixaria de aproveitar a zona mais quente do forno que é a central.

**H. Kleinheisterkamp** — Acho que a tendência era aumentar o cadinho e reduzir o diâmetro do círculo primitivo, e com isso aumentar o trabalho no centro do forno. Esse é o fruto da nossa experiência; estamos modificando um dos nossos fornos nêsse sentido. Creio que no próximo ano poderemos contribuir com alguns dados mais positivos a respeito.

**M. Contrucci** <sup>(6)</sup> — Quero fazer uma indagação relativa à capacidade do forno. 17.500 kVA parece que correspondem a 50.000 toneladas por ano de gusa. Então pergunto se a ACESITA está operando o forno a esse ritmo ou abaixo, e quantos por cento abaixo. Finalmente, se é por questões de programação da empresa ou por dificuldade de operação.

**M. F. Alvim Machado** — O nosso problema é atualmente programação. Temos um forno de 200 toneladas e a nossa aciaria está passando por uma remodelação. No momento, a aciaria atua como um gargalo da usina. É o nosso atual problema. Mas será resolvido, porque estamos providenciando a compra de LD. Nosso forno de redução foi pôsto em marcha, e à primeira vista com certa pressa. Mas isso não é verdade, porquanto o alto-forno ficou parado por três meses para reforma, e o forno de redução é que nêsse período supriu a usina de gusa. Nossa capacidade atual se situa em tórno de 140 toneladas diárias. Mas é preciso que se leve em conta que essa capacidade vai depender de alguns fatores, inclusive a manutenção, que em fornos elétricos de redução deve ser muito bem feita.

**M. Contrucci** — Então o Sr. admite que a ACESITA trabalha em tórno de 70% de sua capacidade. E qual a variação no teor de silício? Essa variação tem apresentado algum problema?

**M. F. Alvim Machado** — A variação do teor de silício obtido no gusa do forno de redução tem-se apresentado em tórno de 1,2 até 2,5. É claro que uma melhor marcha para nós é quando produzimos gusa em tórno de 1,5. Temos notado que a variação do teor de silício em boa parte se deve à variação inversa da resistividade da carga.

(6) Professor de Siderurgia da Escola Politécnica da Universidade Católica; Rio de Janeiro, GB.