

Desenvolvimento de pastilhas combustíveis de dióxido de urânio com adição de óxido berílio para aumento da condutividade térmica.

Carolinne Mol Queiroz¹, Ricardo Alberto Neto Ferreira²

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
Comissão Nacional de Energia Nuclear
Avenida Presidente Antônio Carlos 6627
Cidade Universitária – Pampulha - Caixa Postal 941
CEP: 30161-970 - Belo Horizonte - MG – Brasil
¹carolmol@gmail.com
²ranf@cdtn.br

RESUMO

Está em andamento no CDTN - Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear, um projeto intitulado “Projeto Berílio” que visa aumentar a condutividade térmica de pastilhas combustíveis de UO_2 , aumentando a vida útil dessas pastilhas no reator, o que irá gerar grande economia. Esse aumento de condutividade se dá por meio da adição de BeO às pastilhas combustíveis de UO_2 , já bastante utilizadas na produção de energia nuclear. Apesar de apresentarem várias qualidades, as pastilhas de UO_2 apresentam condutividade térmica relativamente baixa, o que gera um elevado gradiente de temperatura entre o centro e a sua superfície lateral, levando a uma degradação prematura do combustível. A adição de óxido de berílio, cuja condutividade térmica é mais elevada, leva à obtenção de pastilhas que apresentarão menor gradiente de temperatura e conseqüentemente maior durabilidade e melhor aproveitamento de seu potencial energético no reator. Dando continuidade às pesquisas realizadas anteriormente no CDTN, em que foram fabricadas e testadas pastilhas com 7 e 14% em peso de BeO na mistura com UO_2 , estão sendo agora pesquisadas pastilhas com 1, 3 e 5% em peso de BeO na mistura. As propriedades termofísicas dessas pastilhas foram medidas por meio do método Flash laser e assim, foi avaliada a melhoria na condutividade térmica causada pelo aumento gradual da quantidade de BeO na pastilha. São aqui apresentadas as metodologias utilizadas e os resultados obtidos.

1. INTRODUÇÃO

O Projeto Berílio é um programa de pesquisa que está sendo realizado no CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, com o objetivo de desenvolver um novo combustível que consiste numa mistura de dióxido de urânio e óxido de berílio. Esse combustível promete ser mais duradouro que o já utilizado na maioria dos reatores, que apresenta apenas dióxido de urânio em sua composição. A pastilha combustível de UO_2 é bastante segura e estável, entretanto conduz o calor relativamente mal o que acarreta uma degradação prematura do combustível, devida ao elevado gradiente de temperatura resultante entre o centro e a superfície da pastilha. A adição de BeO pretende resolver esse problema levando a uma melhoria da condutividade térmica da pastilha combustível atualmente utilizada e ao seu maior aproveitamento energético.

Este projeto baseia-se no trabalho realizado pelos pesquisadores da Universidade de Purdue, liderados por Alvin A. Solomon, e financiado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (Projeto NERI - Nuclear Energy Research Initiative - Project Number 02-180) [1,2,3].

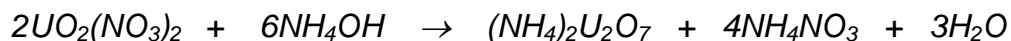
Foram produzidas pastilhas utilizando apenas microesferas combustíveis de dióxido de urânio, para servir de referência para o cálculo do aumento da condutividade térmica causado pela adição de BeO, e pastilhas a partir de microesferas da mesma batelada, mas com adição de 1, 3 e 5% em peso de óxido de berílio. Para cada tipo de material foram produzidas três pastilhas sob três diferentes pressões de compactação (300, 500 e 700 MPa), totalizando 12 pastilhas.

2. METODOLOGIA

2.1. Produção de Microesferas de Dióxido de Urânio

Para a produção das microesferas de UO_2 foi utilizado o processo sol-gel desenvolvido pela firma Nukem/Alemanha [4,5], o qual foi absorvido e implantado no Laboratório de combustível nuclear do CDTN [6], por ocasião do “Programa para Utilização do Tório em Reatores a Água Pressurizada”. O processo, desenvolvido para fabricar-se elementos combustíveis para reatores a alta temperatura refrigerados a gás, foi adaptado para fabricar-se pastilhas combustíveis para reatores a água pressurizada [7,8,9,10,11].

O processo consiste em gotejar uma solução de nitrato de urânio, formando gotas esféricas que endurecem ao reagir com gás amônia e são coletadas em uma solução de hidróxido de amônio como de vê na Fig. 1. São produzidas 1200 microesferas por segundo. Nas etapas subseqüentes, as microesferas são lavadas, secadas, calcinadas e sinterizadas. A reação entre o de nitrato de urânio e a amônia é mostrada a seguir:



nitrato de urânio + hidróxido de amônio \rightarrow diuranato de amônio + nitrato de amônio + água

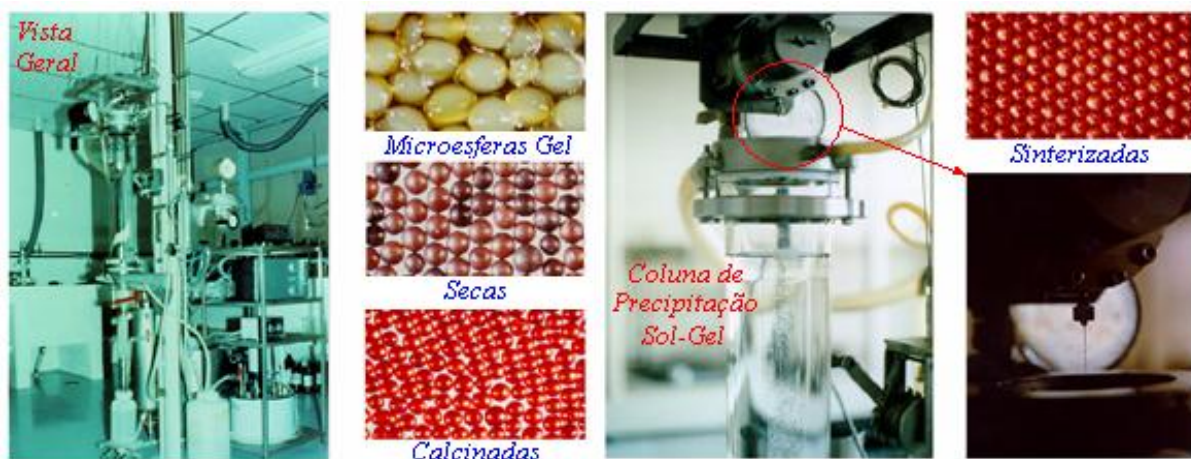


Figura 1. Laboratório de produção de microesferas para fabricação de elementos combustíveis para reatores a alta temperatura refrigerados a gás.

São feitas repetidas lavagens para extrair o nitrato de amônio no equipamento mostrado na Fig. 2 que revolve as microesferas intensamente, até verificar-se que não existe mais nitrato de amônio na água utilizada.

A secagem foi feita à 160°C por 16 horas e a calcinação a 800°C por 3 horas, seguida de redução a 650°C por 4 horas em atmosfera de hidrogênio, e passivação sob atmosfera de CO₂ durante o resfriamento do forno. Não se realizou a sinterização das microesferas, pois as microesferas são prensadas em pastilhas no estado calcinado. A Fig. 3 mostra uma fotografia das microesferas obtidas.

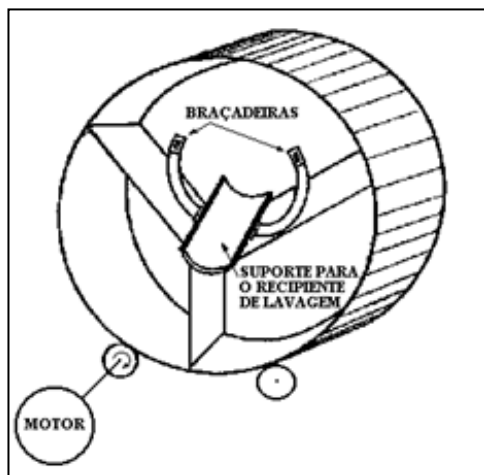


Figura 2. Equipamento usado na lavagem das microesferas.

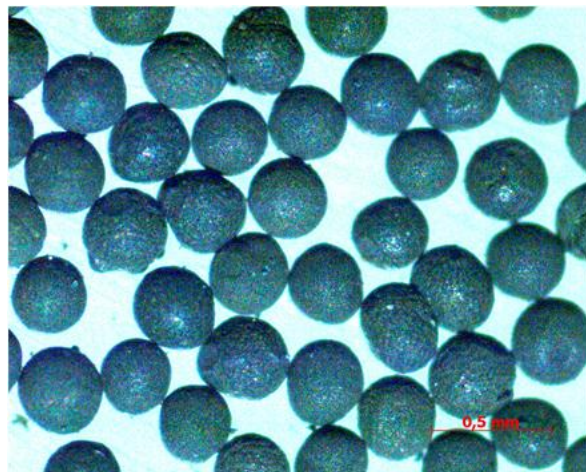


Figura 3. Microesferas produzidas pelo processo sol-gel para a fabricação das pastilhas.

Este processo permite também a produção de microesferas de dióxido de tório, óxido misto de tório e urânio, em qualquer proporção, bem como de dióxido de plutônio e óxido mistos de plutônio e estes elementos, além de carbetos, oxycarbetos, e diversos outros materiais.

2.2 Fabricação das Pastilhas Combustíveis

A partir das microesferas de UO₂ produzidas usando esta técnica sol-gel e de óxido de berílio fornecido pela empresa Sigma-Aldrich foram feitas e homogeneizadas três misturas contendo 1%, 3% e 5% em peso de BeO. Sob pressões de compactação de 300, 500 e 700 Mpa foram então fabricadas três pastilhas com cada uma destas misturas e três pastilhas, com a mesma batelada de microesferas, mas sem adição de BeO para servir de referência para o cálculo do aumento da condutividade térmica causado pelas adições de BeO. Utilizou-se o modelo especial de prensa hidráulica mostrada na Fig. 4, a qual foi desenvolvida no CDTN [12], e cujo ciclo é mostrado na Fig. 5. O diâmetro da matriz utilizada é de 11,1mm, o sistema trabalha com matriz flutuante para se obter o chamado duplo efeito, e foi usado óleo lubrificante somente sobre a superfície da matriz, ou seja, não se utilizou lubrificante interno. O óleo utilizado foi o óleo CL-OF-130 da Petrobrás.



Figura 4. Prensa hidráulica para fabricação de pastilhas combustíveis.

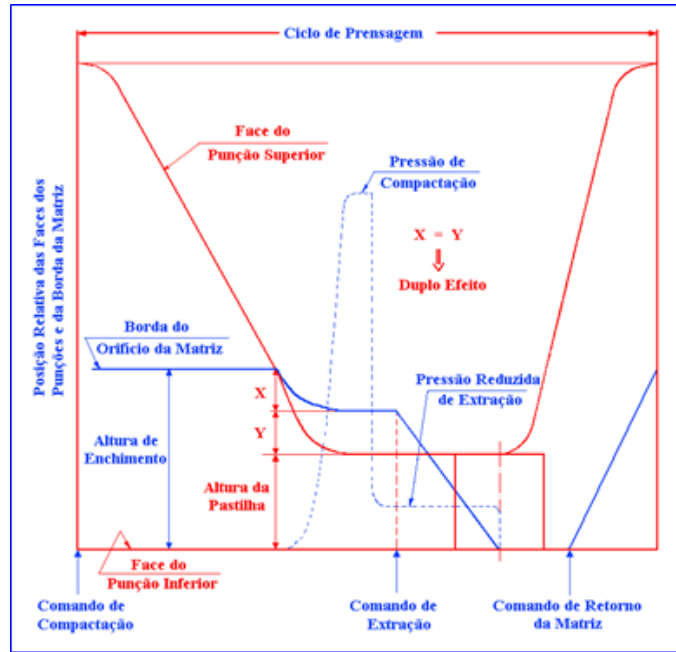


Figura 5. Ciclo de prensagem.

2.3 Caracterização das Pastilhas

2.3.1 Densidade das pastilhas a verde

A densidade (ρ_v) das pastilhas a verde, ou seja, no estado prensado, foram determinadas geometricamente a partir da seguinte equação:

$$\rho_v = \frac{m_v}{\frac{\pi \cdot d_v^2 \cdot h_v}{4}} \quad (1)$$

onde:

m_v = massa da pastilha a verde [g]

d_v = diâmetro da pastilha a verde [cm]

h_v = altura da pastilha a verde [cm]

A altura e o diâmetro foram medidas com um paquímetro possuindo resolução de 10^{-2} mm, e a massa foi obtida com uma balança possuindo resolução de 10^{-2} g.

As pastilhas foram então sinterizadas em forno a 1750°C durante duas horas em atmosfera de hidrogênio. Da mesma forma, foram realizadas medidas de diâmetro, altura e massa, mas com micrômetro com resolução de 10^{-3} e de massa com balança analítica com resolução de 10^{-4} , e calculou-se geometricamente a densidade das pastilhas sinterizadas da mesma forma feita para as pastilhas a verde.

2.3.2 Densidade e porosidade aberta das pastilhas sinterizadas

A densidade das pastilhas sinterizadas foi também medida de forma mais precisa através do método de penetração e imersão com xylol [13,14,15] desenvolvido no laboratório de UO₂ do Centro de Pesquisas da Kraftwerk Union localizado em Erlangen - Alemanha, o qual foi absorvido, transferido e implantado nos laboratórios de combustíveis nucleares do CDTN [16].

Com base nesse método, as pastilhas são colocadas em uma bandeja (Fig. 6), dentro de uma estufa por 2 horas para ficarem secas. Após resfriamento em um dessecador sob vácuo, a massa da pastilha é medida com uma balança analítica (resolução: 10⁻⁴g). A seguir a bandeja com as pastilhas é colocada em um recipiente no interior do dessecador onde vácuo de pelo menos 10⁻¹ torr é estabelecido e mantido por duas horas a fim de extrair o ar da porosidade aberta das pastilhas (Fig. 7).

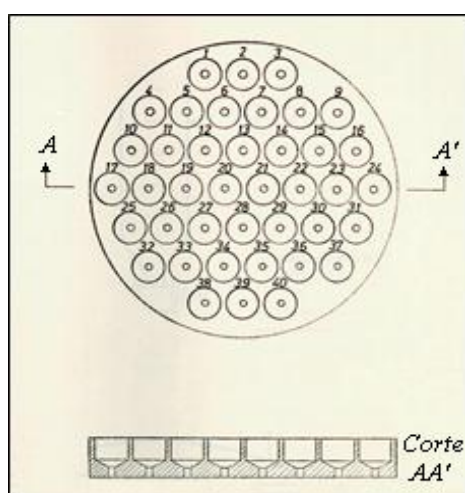


Figura 6. Bandeja para impregnação de Pastilhas com xylol.

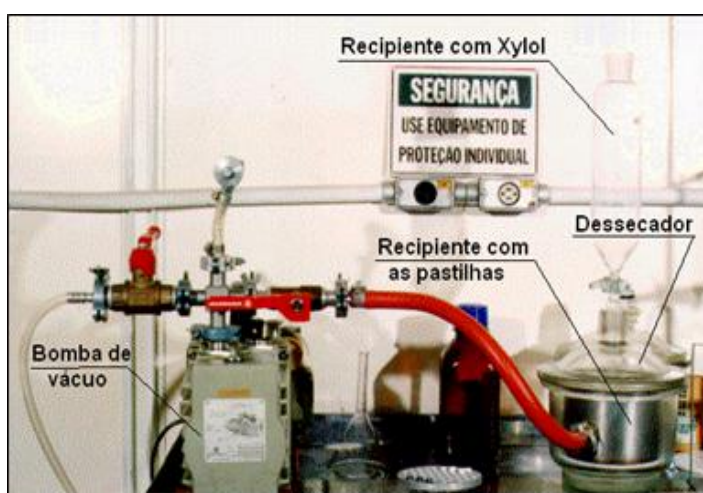


Figura 7. Sistema utilizado no método de penetração e imersão com xylol para impregnação das pastilhas.

Decorrido este tempo o recipiente com a bandeja é inundado com xylol de forma que esse líquido penetre na porosidade aberta das pastilhas. Cada pastilha é então pesada no prato superior da balança analítica mostrada na Fig. 8, e dessa forma encontra-se a massa de xylol contida na porosidade aberta (Fig. 9), pela diferença entre a massa da pastilha impregnada (M_i) e a massa da pastilha medida após a secagem (M).

Portanto, sabendo-se a massa de xylol dentro da porosidade aberta e a densidade do xylol, é possível encontrar o volume da porosidade aberta (V_{PA}):

$$V_{PA} = \frac{M_i - M}{\rho_{xylol}} \quad (2)$$

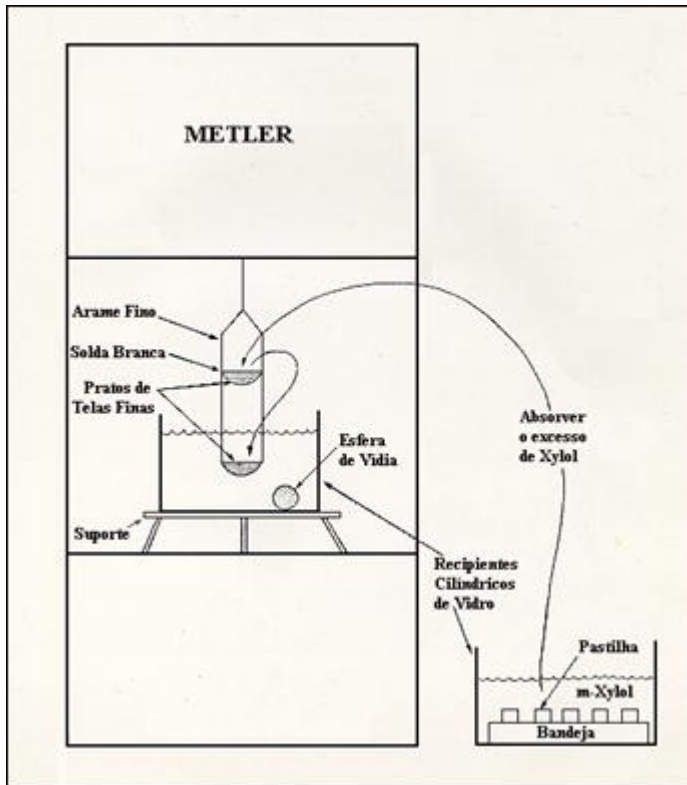


Figura 8. Bandeja dupla para medição da densidade e porosidade aberta das pastilhas.

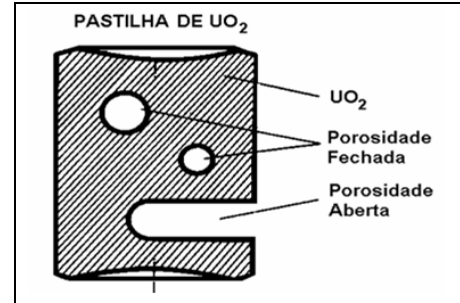


Figura 9. Porosidade aberta e fechada de uma pastilha (esquemáticamente).

Coloca-se então a pastilha no prato inferior imerso em xylol. Pela diferença entre a massa da pastilha (M) e a massa sob empuxo (M_E), obtém-se a massa do volume de xylol deslocado. Este volume deslocado é igual à $V_M + V_{PF}$, onde V_M é o volume do material sem poros e V_{PF} é o volume da porosidade fechada, isto é:

$$V_M + V_{PF} = \frac{M - M_E}{\rho_{xylol}} \quad (3)$$

O volume da pastilha V é dado pela soma dos três volumes:

$$V = V_M + V_{PF} + V_{PA} = \frac{M_i - M_E}{\rho_{xylol}} \quad (4)$$

Assim a densidade da pastilha sinterizada (ρ_S) é dada por:

$$\rho_S = \frac{M}{V} = \frac{M}{M_i - M_E} \cdot \rho_{xylol} \quad (5)$$

A porosidade aberta em termos absolutos, ou seja, em relação ao volume da pastilha ($\%V$), é dada por:

$$\%V = \frac{V_{PA}}{V} \times 100\% = \frac{M_i - M}{M_i - M_E} \cdot 100\% \quad (6)$$

A densidade do xylol é determinada antes da medição da primeira pastilha. É determinado o empuxo em uma esfera de aço, cuja massa e diâmetro são conhecidos com exatidão por meio de micrômetro (resolução: 10^{-3} mm) e de balança analítica (resolução: 10^{-5} g). Então, a densidade do xylol é calculada com a seguinte equação:

$$\rho_{xylol} = \frac{M_{Esf.} - M_{Esf.E.}}{\frac{\pi \cdot D_{Esf.}^3}{6}} \quad (7)$$

onde:

ρ_{xylol} = densidade do xylol [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$];
 $M_{Esf.}$ = massa da esfera [11,89230 g];
 $M_{Esf.E.}$ = massa da esfera sob empuxo [g];
 $D_{Esf.}$ = diâmetro da esfera [1,4285 cm].

2.3.3. Propriedades termofísicas das pastilhas combustíveis

As medições de difusividade térmica de cada pastilha e de seu calor específico para então calcular-se a sua condutividade térmica, foram realizadas no LMPT-Laboratório de Medição de Propriedades Termofísicas de Combustíveis Nucleares e Materiais do CDTN [17], utilizando o Método Flash Laser [18], cujo princípio é mostrado na Fig. 10.

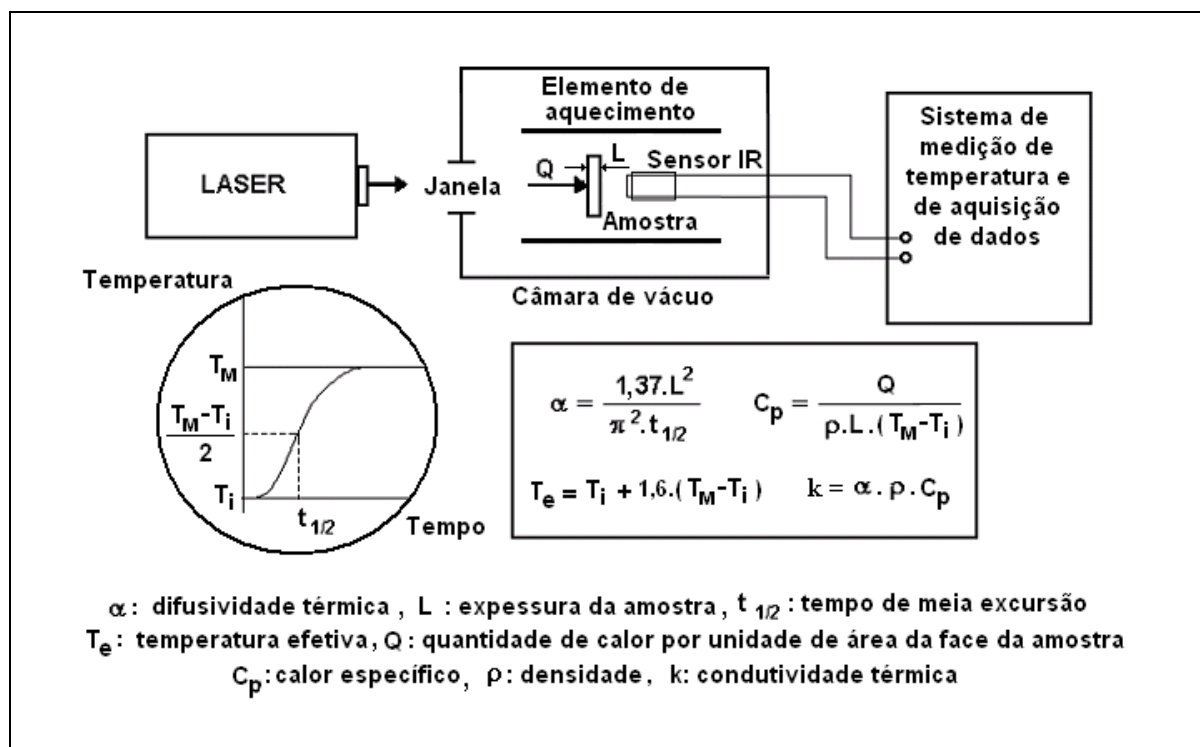


Figura 10. Princípio do método flash laser.

Esse método se baseia em aplicar na face frontal da amostra um flash intenso de energia radiante de curta duração proveniente de uma lâmpada flash ou de um laser. O tempo de irradiação usado para as amostras foi de 20 milisegundos, a potência do laser de CO₂ utilizado foi de 100W, e foi feito um recobrimento de fuligem nas amostras, de forma que todas possuíssem a mesma emissividade de 0,88. A elevação de temperatura na face oposta é medida por um termômetro infravermelho e registrada. A partir do registro obtido é possível então determinar a difusividade térmica da amostra de acordo com a seguinte equação [18]:

$$\alpha = \frac{1,37L^2}{\pi^2 \cdot t_{1/2}} \quad (8)$$

onde:

α = difusividade térmica [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$];

L = espessura da amostra [m];

$t_{1/2}$ = tempo de meia excursão [s].

A temperatura efetiva T_e , correspondente ao valor encontrado para a difusividade térmica é calculado por meio da seguinte equação:

$$T_e = T_i + 1,6 (T_M - T_i) \quad (9)$$

onde:

T_i = temperatura inicial da amostra [K];

T_M = temperatura máxima atingida na face oposta da amostra [K].

O valor de calor específico C_p [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], é calculado utilizando-se a seguinte equação:

$$C_p = \frac{Q}{\rho \cdot L (T_M - T_i)} \quad (10)$$

onde:

Q = quantidade de calor absorvida por unidade de área da face da amostra [$\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$]

ρ = densidade da amostra [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

L = espessura da amostra [m]

Para se obter os valores de calor específico das pastilhas, utilizou-se como referência uma amostra padrão de Pirocerâmico 9606 fornecido pela NETZSCH que apresenta valores de calor específico conhecido ($800 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), e utilizou-se o mesmo revestimento de fuligem. Foram feitas cinco medições nas mesmas condições das pastilhas em questão, e calculou-se por meio da equação (9) o valor médio de Q . Este valor médio foi então empregado para se calcular os respectivos calores específicos das pastilhas por meio desta mesma equação.

A condutividade térmica (k) foi então calculada a partir da equação (11) abaixo:

$$k = \alpha \cdot \rho \cdot C_p \quad (11)$$

A Fig. 11 mostra esquematicamente a aparelhagem utilizada no CDTN para medição de propriedades termofísicas. Foram feitas pelo menos cinco medidas para cada pastilha.

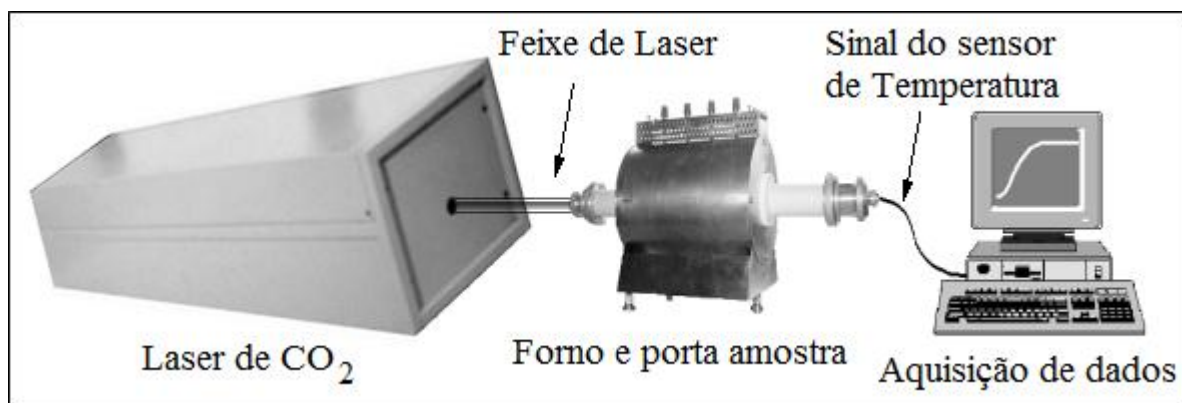


Figura 11. Aparelhagem utilizada no CDTN para medição de propriedades termofísicas por meio do método flash laser.

2.3.4. Microestruturas das Pastilhas

Foram empregados os métodos convencionais de preparo ceramográfico e microscopia ótica para obtenção de fotografias das microestruturas.

3. RESULTADOS

A tabela 1 apresenta os parâmetros de peletização, as dimensões das pastilhas a verde e as densidades a verde obtidas.

Tabela 1. Parâmetros de peletização, dimensões e densidades a verde das pastilhas.

Código da Pastilha	Material	Pressão de Compactação [MPa]	Pastilha a Verde			
			Altura h_v [cm]	Diâmetro d_v [cm]	Massa m_v [g]	Densidade a verde- ρ_v [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]
BE 032	UO ₂	300	0,324	1,114	1,69	5,352
BE 033	UO ₂ +1% BeO	300	0,370	1,130	1,95	5,255
BE 034	UO ₂ +3% BeO	300	0,364	1,124	1,86	5,150
BE 035	UO ₂ +5% BeO	300	0,408	1,126	1,91	4,701
BE 036	UO ₂	500	0,284	1,120	1,60	5,718
BE 037	UO ₂ +1% BeO	500	0,330	1,126	1,86	5,660
BE 038	UO ₂ +3% BeO	500	0,340	1,124	1,80	5,335
BE 039	UO ₂ +5% BeO	500	0,344	1,124	1,73	5,068
BE 040	UO ₂	700	0,272	1,124	1,58	5,854
BE041	UO ₂ +1% BeO	700	0,314	1,124	1,81	5,809
BE 042	UO ₂ +3% BeO	700	0,320	1,124	1,78	5,606
BE043	UO ₂ +5% BeO	700	0,332	1,128	1,75	5,275

As pastilhas BE 035, BE 039 e BE 043 com 5% em peso de BeO quebraram nos procedimentos de caracterização citados e, portanto os resultados apresentados nas tabelas 2 e 3 a seguir são referentes somente às demais pastilhas.

A Fig. 12 mostra a influência da pressão de compactação nas densidades das pastilhas a verde, e a Fig. 13 mostra um gráfico das densidades sinterizadas das pastilhas em função da pressão de compactação.

Tabela 2. Dimensões e densidades sinterizadas das pastilhas.

Código da Pastilha	Material	Pastilha Sinterizada					
		Altura h_s [cm]	Diâmetro d_s [cm]	Massa m_s [g]	Densidade Geométrica [g·cm ⁻³]	Densidade Sinterizada [g·cm ⁻³]	Porosidade Aberta-%V [%]
BE 032	UO ₂	0,2572	0,9093	1,5972	9,5628	9,914	7,14
BE 033	UO ₂ +1%BeO	0,3000	0,9137	1,8529	9,4196	9,743	7,07
BE 034	UO ₂ +3%BeO	0,2997	0,9144	1,7574	8,9294	9,280	9,34
BE 036	UO ₂	0,2305	0,9292	1,5129	9,6790	10,059	6,20
BE 037	UO ₂ +1%BeO	0,2789	0,9329	1,7779	9,3261	9,719	7,41
BE 038	UO ₂ +3%BeO	0,2731	0,9335	1,7250	9,2289	9,587	6,58
BE 040	UO ₂	0,2263	0,9389	1,5021	9,5871	10,008	6,51
BE041	UO ₂ +1%BeO	0,2656	0,9421	1,7264	9,3246	9,642	6,92
BE 042	UO ₂ +3%BeO	0,2700	0,9441	1,6974	8,9804	9,290	5,02

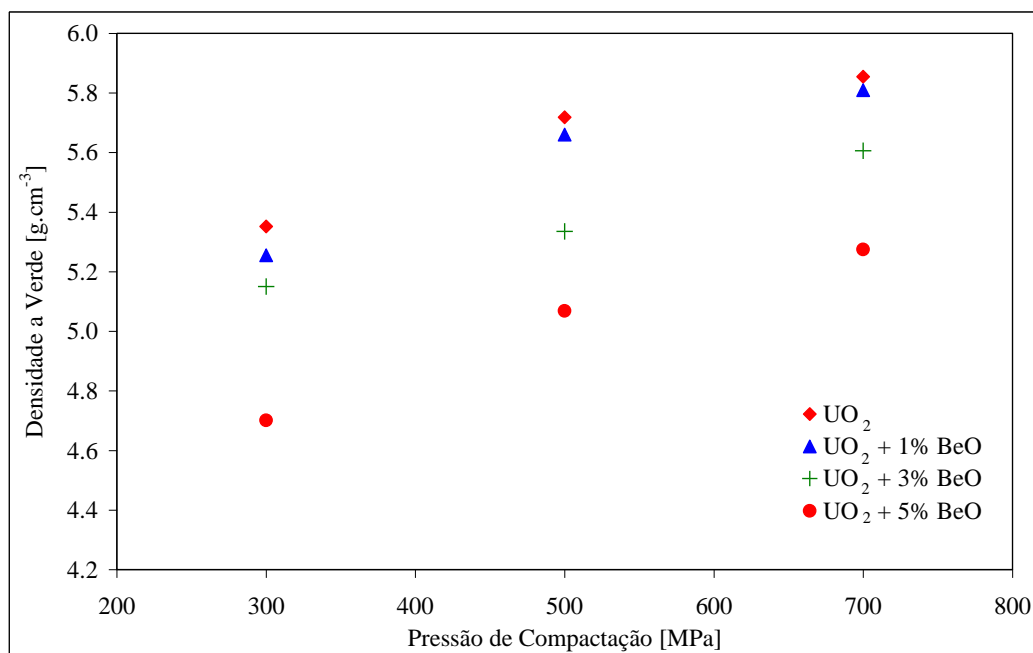


Figura 12. Gráfico da densidade das pastilhas a verde em função da pressão de compactação.

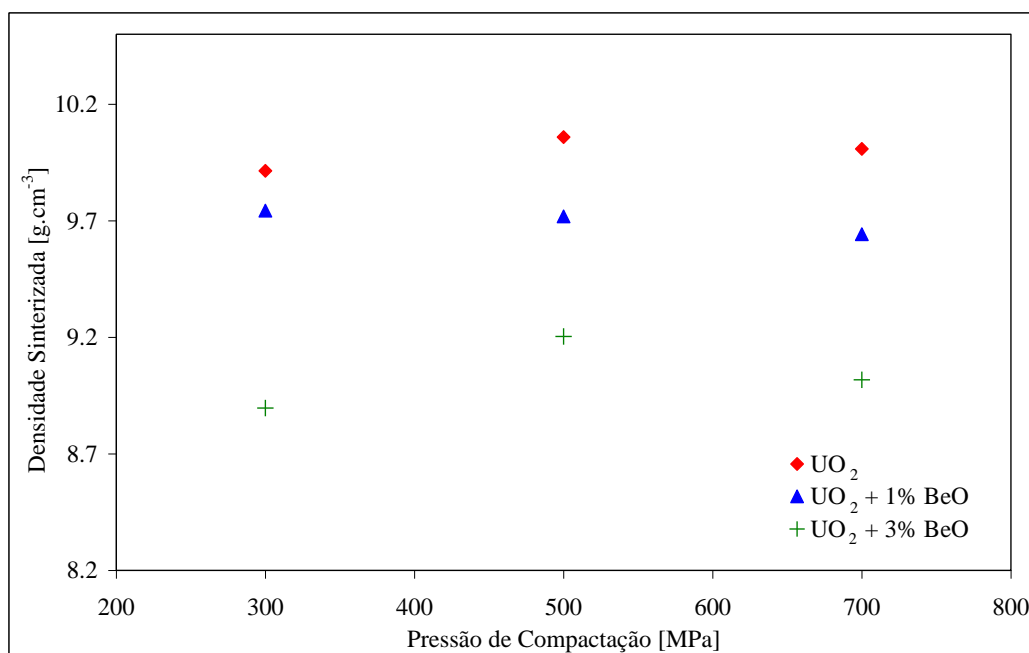


Figura 13. Gráfico da densidade das pastilhas sinterizadas em função da pressão de compactação.

Na Tabela 3 a seguir, os valores apresentados de densidade sinterizada são valores médios entre as densidades de cada tipo de pastilha, e os valores de difusividade térmica, temperatura efetiva e calor específico são resultantes das médias entre os valores médios de cada tipo de pastilha, obtidos a partir de pelo menos 5 medições em cada amostra.

Tabela 3. Propriedades Termofísicas das Pastilhas.

Material	Difusividade Térmica $\times 10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Temp. Efetiva $^{\circ}\text{C}$	Densidade Sinterizada $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Calor Específico $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}$	Condutividade Térmica $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}$	Aumento da Cond. Térmica %
UO ₂	2,21	28,15	9994	310	6,85	0,0
UO ₂ +1% BeO	2,23	27,68	9701	356	7,71	12,6
UO ₂ +3% BeO	2,73	27,31	9386	401	10,28	50,1

As Figuras 14 e 15 mostram gráficos dos aumentos da difusividade térmica e da condutividade térmica em função do aumento do teor de óxido de berílio.

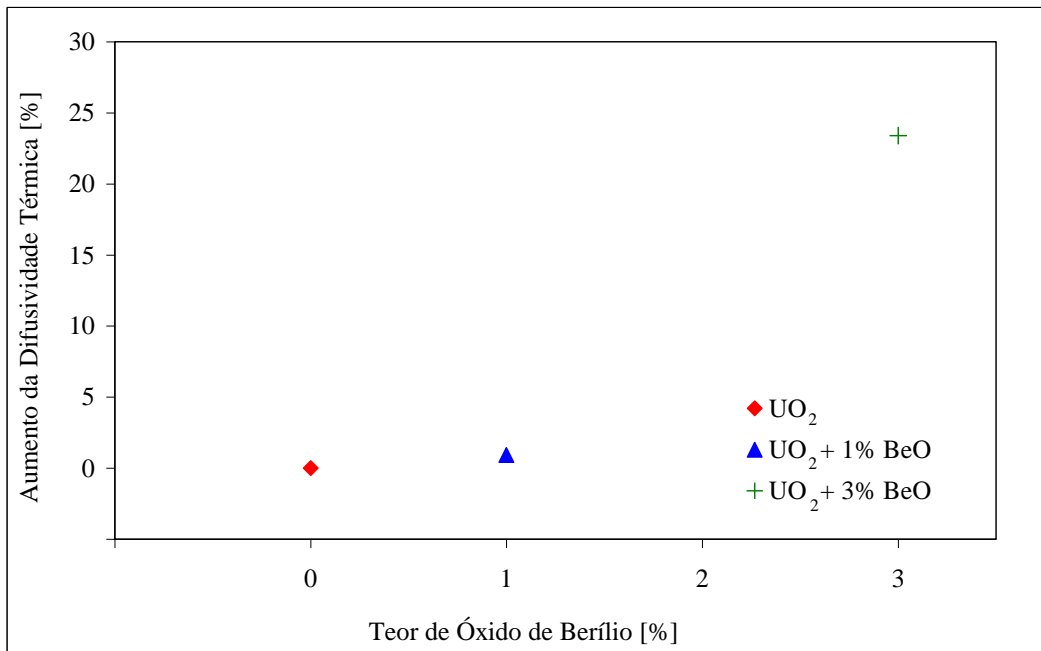


Figura 14. Aumento da difusividade térmica em função do aumento do teor de óxido de berílio.

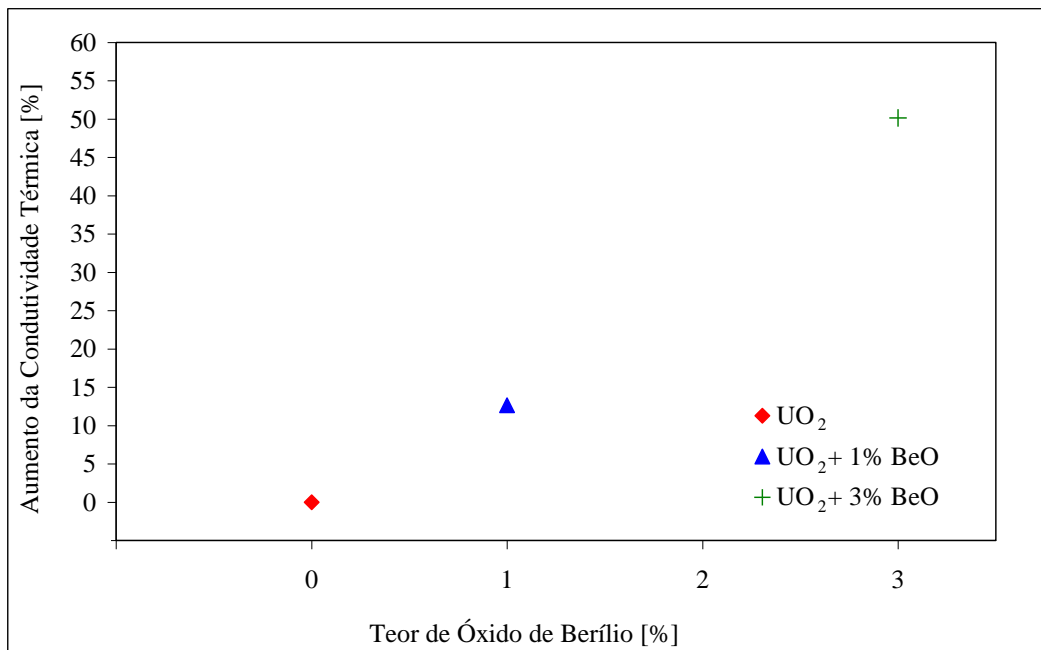


Figura 15. Aumento da condutividade térmica em função do aumento do teor de óxido de berílio.

As Figuras 16, 17 e 18 apresentam as microestruturas das pastilhas fabricadas sob pressão de compactação de 700 Mpa.

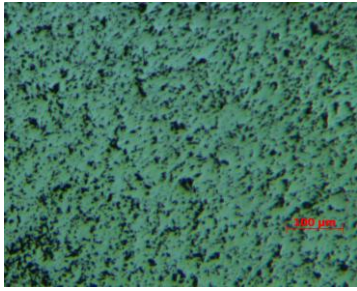


Figura 16. Microestrutura da Pastilha BE040 (UO₂)

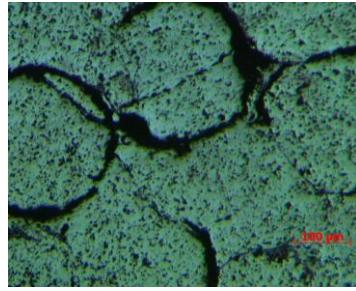


Figura 17. Microestrutura da Pastilha BE041 (UO₂ + 1% de BeO).

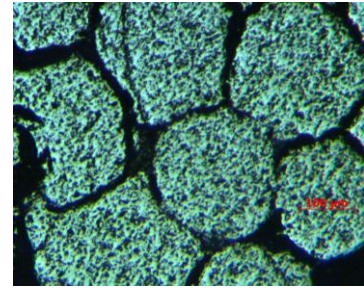


Figura 18. Microestrutura da Pastilha BE042 (UO₂ + 3% de BeO).

Os resultados relativos às pastilhas de UO₂ estão em boa concordância com dados existentes na literatura [19], bem como em relação aos resultados das pesquisas realizadas no contexto do Programa NERI por Alvin A. Solomon e sua equipe na Universidade de Purdue [1,2,3].

4. CONCLUSÃO

Foi possível fabricar-se, a partir de microesferas produzidas por meio do processo sol-gel, pastilhas de dióxido de urânio, bem como pastilhas de dióxido de urânio com adições de 1% e 3% em peso de óxido de berílio, e caracterizá-las quanto às suas propriedades termofísicas empregando-se o método flash laser.

Os valores médios de condutividade térmica das pastilhas analisadas foram de $6,85 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{k}^{-1}$ para as pastilhas de UO₂ puro, ou seja, sem adição de BeO, $7,71 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{k}^{-1}$ para as pastilhas com 1% em peso de BeO e $10,28 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{k}^{-1}$ para as pastilhas com 3% em peso BeO. Em relação às pastilhas de UO₂ puro, verificou-se um aumento médio da condutividade térmica de 12,6% para as pastilhas com 1% em peso de BeO e de 50,1% para as pastilhas com 3% em peso de BeO.

Verificou-se que há uma boa concordância com dados existentes na literatura para o caso das pastilhas de UO₂ sem adição de óxido de berílio.

Em uma próxima etapa estas pastilhas serão caracterizadas quanto as suas distribuições de tamanhos de poros, e serão fabricadas novas pastilhas com uma nova batelada de microesferas que se encontra em fase final de fabricação.

Espera-se que os resultados desses estudos possam vir a ser de utilidade no futuro para uma eventual produção industrial deste tipo de combustível avançado no país.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do CNPq a este trabalho na forma de bolsa do “Programa de Bolsas de Iniciação Científica CNEN/CNPq” para a estudante de Engenharia Química da Escola de Engenharia da UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais, Carolinne Mol Queiroz.

REFERÊNCIAS

1. Sarma, K. H., Fourcade, J., Lee, S-G., Solomon, A. A., “New processing methods to produce silicon carbide and beryllium oxide inert matrix and enhanced thermal conductivity oxide fuels,” *Journal of Nuclear Materials*, **352**, pp.324-333 (2006).
2. “Nuclear Energy Research Initiative 2004 Annual Report, DOE/NE-126, http://www.ne.doe.gov/pdfFiles/NERI2004AnnualReport_FINAL.pdf (2004).
3. Solomon, A. A., Revankar, S., McCoy, J. K., *Enhanced Thermal Conductivity Oxide Fuels, Final Report, Period of September 15, 2002 to September 14, 2005*, NERI Project No. 02-180, Award No. DE-FG07-02SF22613 (2005).
4. Kadner, M., Baier, J. “Über die Herstellung von Brennstoffkernen für Hochtemperaturreaktor-Brennelemente,” *Kerntechnik*, **18**, n.10, pp.413-420 (1976).
5. Naefe, P. *Beitrag zur Refabrikation von Th/U – Mischoxidkernen mit einen naßchemischen Verfahrenen*, Kernforschungsanlage Jülich GmbH, Jülich, Germany, (Jül-1229) (1975).
6. Ferreira, R.A.N. Relatório de Missão do Engenheiro Ricardo Alberto Neto Ferreira na Alemanha - Fundamentos do Processo de Precipitação Gel da Nukem, Nuclebrás, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, Brasil, (Relatório de Missão DETS.PD.01/80) (1980).
7. KFA, KWU/SIEMENS, NUKEM, NUCLEBRÁS/CDTN, *Program of Research and Development on the Thorium Utilization in PWRs Final report*, Kernforschungsanlage Jülich GmbH, Jülich, Germany, (Jül-Spez. 488) (1988).
8. PEEHS, M., DÖRR, W.O., HROVAT, H. et al. “Development of a pelletized (Th,U)O₂-fuel for LWR-application,” *International Atomic Energy Agency Advisory Group Meeting on Advanced Fuel Technology and Performance*, Wuerenlingen, Switzerland, **244**, pp.175-185 (IAEA-TECDOC-352/85) (1985).
9. Ferreira, R.A.N., *Modelo para o Comportamento de Microesferas Combustíveis de Tório e Urânio na Peletização*, Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP-Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, Tese (Doutorado em Engenharia Química) (2000).
10. Ferreira, R.A.N., “A Model for the Behavior of Thorium Uranium Mixed Oxide Kernels in the Pelletizing Process,” *Journal of Nuclear Materials*, **350**, pp.271-283 (2006).
11. Ferreira, R.A.N. *Comportamento de Microesferas de (Th,5%U)O₂ em Ensaios de Compressão e Peletização*, Escola de Engenharia da UFMG-Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) (1982).
12. Ferreira, R. A. N., “Desenvolvimento no CDTN de Processo de Fabricação de Pastilhas Combustíveis,” *VII CGEN- Congresso Geral de Energia Nuclear*, Belo Horizonte, MG, Brasil, 31 de Agosto a 3 de Outubro, CD-ROM (1999).
13. Maier, G., *Dichte und Porositätsmessung nach der Penetrations-Immersions Methode: Überprüfung und Möglichkeiten zur Verbesserung*, Kraftwerk Union, Erlangen, Germany, (Arbeits-Bericht) (1978).
15. Maier, G., *Round Robin - Dichtmeß - Programm - Abschließende Ergebnisse*, Kraftwerk Union, Erlangen, Germany, (Ergebnis-Bericht) (1976).
15. Dörr, W, Assmann, H., Maier, G., Steven, J., “Bestimmung der dichte, offenen porosität, porengrossenverteilung und spezifischen oberfläche von UO₂-tabletten,” *Journal of Nuclear Materials*, **81**, pp.135-141 (1979).
16. Ferreira, R. A. N., Lopes, J. A. M. “Implementation of a fuel pellets density and open porosity measurement system by the xylol penetration-immersion method at CDTN,”

International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2007, Santos, SP, Brazil, September 30 to October 5, CD-ROM (2007).

17. Ferreira, R. A. N.; Miranda, O.; Dutra Neto, A.; Grossi, P. A.; Martins, G. A.; Reis, S. C.; Alencar, D. A.; Soares Filho, J. G.; Lopes C. C., Pinho, M. G., 2002, "Implantação no CDTN de Laboratório de Medição de Propriedades Termofísicas de Combustíveis Nucleares e Materiais através do Método Flash Laser," *International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2002*, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 11 to 16 August, CD-ROM (2002).
18. Parker, W. J.; Jenkins, R. J.; Butler, C. P. and Abbott, G. L., "Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity and Thermal Conductivity," *J. Appl. Phys.*, **32**, pp.1679-1684 (1961).
19. Fink, J. K., "Thermophysical properties of uranium dioxide," *Journal of Nuclear Materials*, **279**, pp.1-18 (2000).