

Tema: Materiais cerâmicos, compósitos e poliméricos

DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES ELÁSTICAS POR ULTRASSOM EM ALUMINA (Al₂O₃) SIMULANDO PASTILHAS COMBUSTÍVEIS DE URÂNIO(UO₂)*

Alessandra Susanne Viana Ragone Lopes¹

Douglas Brandão Baron²

Marcelo de Siqueira Bittencourt³

Mauro Carlos Lopes Souza⁴

Resumo

Pastilhas de Urânio (UO₂) são empregadas como combustível nos reatores de potência, onde as condições operacionais introduzem elevados gradientes térmicos nas pastilhas. Potências elevadas propiciam a fusão da parte central das pastilhas. O inchamento das pastilhas UO₂, decorrente dos produtos de fissão, causa trincamento do material e o estudo do seu comportamento é importante. Esse trabalho avaliou a aplicação de método ultrassônico na obtenção de constantes elásticas. Em função das dificuldades no manuseio do material nuclear, optou-se por um estudo comparativo em pastilhas de alumina (Al₂O₃). Foram fabricados e usados dois conjuntos de 10 pastilhas de Al₂O₃ com densidades de 92% e 96%. Foi utilizada técnica ultrassônica por transmissão obtendo medidas do tempo de percurso de ondas ultrassônicas, longitudinais e transversais, usadas para a determinação das constantes elásticas do material. Equações relacionando densidade do material e velocidade da onda ultrassônica ao módulo de elasticidade, módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson, permitiram obter essas constantes elásticas, que apresentaram excelente concordância com a literatura disponível para o Al₂O₃.

Palavras-chave: Ultrassom; Onda ultrassônica; Constantes elásticas; Alumina.

DETERMINATION OF THE ELASTIC CONSTANTS BY ULTRASOUND IN ALUMINA (Al₂O₃) SIMULATING URANIUM FUEL PELLETS (UO₂)

Abstract

Uranium pellets (UO₂) are used as fuel in power reactors, where operational conditions introduce high thermal gradients in the tablets. High powers provide the in the middle of the pellet. The swelling of UO₂ pellets, resulting from the fission products, causes cracking of the material and it's important to study their behavior. This study evaluated the application of the ultrasonic method in obtaining elastic constants. Due to the difficulties in handling nuclear material, we chose a comparative study in tablets of alumina (Al₂O₃). Were made and used two sets of pads 10 Al₂O₃ with densities of 92% and 96%. Ultrasonic transmission technique was used for obtaining measurements of the travel time of the ultrasonic longitudinal and transverse waves. These are used for determining the elastic constants of the material. Equations relating material density and velocity of the ultrasonic wave to the elasticity, shear and Poisson's modules have led to these elastic constants, which showed excellent agreement with literature available to Al₂O₃.

Keywords: Ultrasound; Ultrasonic wave; Elastic constants; Alumina.

¹ *Engenheira Mecânica, Mestranda, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

² *Físico, MSc, Professor, Colaborador do Instituto de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

³ *Engenheiro Metalúrgico, DSc, Pesquisador/Instituto de Engenharia Nuclear, Comissão Nacional de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

⁴ *Engenheiro Químico, DSc, Professor Colaborador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

* *Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Em reatores de potência a água leve (PWR, BWR) e água pesada (PHWR, CANDU) é utilizada combustível de UO_2 .

O combustível de UO_2 é mais comumente apresentado em forma de pastilhas cilíndricas sinterizadas com densidade na faixa de 92 a 95% da densidade teórica [1].

A condutividade térmica do UO_2 é um pouco baixa e a alta potência gerada no reator leva a existência de altos gradientes térmicos na pastilha combustível. Como consequência, altos níveis de potência podem levar a fusão da parte central da pastilha, no entanto isto é evitado em reatores térmicos, pois pode gerar problemas de desempenho. As principais limitações no desempenho do UO_2 são o inchamento da pastilha causado por produtos de fissão (sólidos e gasosos) e a liberação de produtos de fissão gasosos para o ambiente contido pelo revestimento, deteriorando a transferência de calor do combustível para o refrigerante.

Desta forma é importante o estudo do comportamento elástico nas pastilhas de UO_2 . Como o recurso para a obtenção dessas pastilhas é limitado, devido há uma séria de normas de segurança nuclear optou-se por realizar um estudo comparativo em pastilhas de alumina (Al_2O_3). Assim sendo a pastilha de alumina que também é um material cerâmico e que também faz parte do conjunto da vareta combustível, foi a escolha predominante para a análise das constantes elásticas [2].

Para obter as constantes elásticas das pastilhas produzidas, comumente utilizam-se técnicas destrutivas, que envolvem diversas etapas e cuidados, e conseqüentemente demandam tempo e recursos financeiros.

O ensaio não destrutivo por ultrassom permite se medir espessuras, detectar poros, descontinuidades internas e analisar a estrutura dos materiais.

Como a propagação da onda sonora depende da estrutura interna e das descontinuidades existentes no material, pode-se associar a velocidade de propagação da onda às suas propriedades elásticas [3].

Diante deste cenário, técnicas ultrassônicas podem ser utilizadas como uma possível alternativa para a análise das constantes elásticas.

O presente trabalho tem por objetivo estudar as constantes elásticas da alumina e por essa técnica não destrutiva, de modo a que no futuro ser utilizada no UO_2 .

O efeito da porosidade nas propriedades dos materiais cerâmicos tem sido estudado a longa data (desde a década de 1950), pois a principal rota de processamento destes materiais é a tecnologia do pó, que geralmente resulta em uma fração de poros residual involuntária, em decorrência da limitação do processo de densificação na sinterização ou da otimização tecnológica de custo/benefício [1]. Dentre as propriedades mecânicas, o efeito da porosidade tem sido estudado principalmente no módulo de elasticidade.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

As ondas ultrassônicas são ondas mecânicas geradas, na maioria das vezes, por um elemento piezoelétrico montado em um transdutor. Os transdutores ou cabeçotes possuem basicamente um cristal piezoelétrico em seu interior, envolto por uma capa metálica responsável pela proteção, com conectores elétricos que têm a função de conectar o transdutor ao aparelho de ultrassom que ao variar a tensão aplicada ao cristal, faz com que este vibre emitindo ondas sônicas. Dentro da armação ainda existe um bloco amortecedor, para impedir que o cristal continue

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

vibrando depois de cessarem os pulsos elétricos. Na parte inferior do transdutor existe uma proteção, para impedir o contato direto do cristal com a peça, como pode ser visualizado na Figura 1 [4].

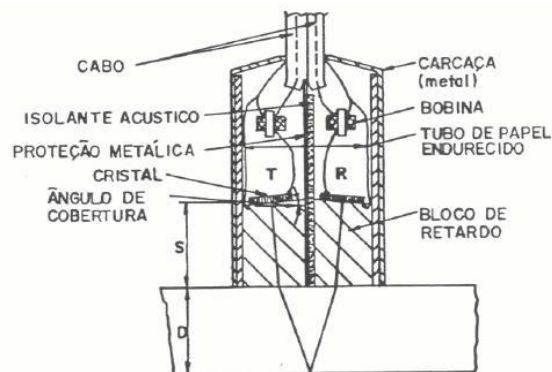


Figura 1: Exemplo de esquema de um transdutor do tipo SE acoplado a uma superfície.

Para a transmissão do pulso ultrassônico para determinado meio, em geral é necessário o uso de um acoplante de modo a impedir que exista uma camada de ar entre a base do transdutor e a superfície da peça. Esta camada de ar impede que as vibrações mecânicas produzidas pelo transdutor se propaguem para a peça em razão de características acústicas (impedância acústica) diferentes entre o acrílico do transdutor e do ar.

De acordo com a aplicação realizada, as inspeções ultrassônicas podem adotar diferentes métodos de utilização de transdutores. Em geral são utilizados dois métodos: a transmissão, e o pulso-eco. Nesse trabalho foi utilizado o de transmissão. Nesse método são utilizados dois transdutores, um transdutor funciona como emissor e o outro transdutor colocado geralmente na superfície oposta ao primeiro funciona como receptor. Assim, o pulso ultra-sônico emitido pelo primeiro transdutor atravessa o material e é captado pelo segundo transdutor, como mostra a Figura 2 [4].



Figura 2: Exemplo de esquema de transdutores sendo utilizados no modo transmissão.

As ondas ultrassônicas mais empregadas são as longitudinais e as transversais. Quando a onda longitudinal, ou onda de compressão, se propaga as partículas do meio, em que ela se propaga, vibram na mesma direção de propagação da onda nesse meio. Nas ondas transversais, ou cisalhantes, as partículas movem-se perpendicularmente à direção de propagação da onda no meio [4]. A velocidade de fase de ondas ultrassônicas longitudinais e cisalhantes propagando através de um sólido isotrópico ou quase isotrópico, materiais policristalinos com uma distribuição

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

aleatória da orientação dos grãos, é descritas com excelente aproximação através das equações (1) e (2), a relação entre essas velocidades é mostrada na equação (3). Onde, V_L e V_T são as velocidades das ondas longitudinal e transversal, respectivamente, ρ a densidade do material, μ o coeficiente de Poisson, E e G os módulos de Young e de cisalhamento, respectivamente.

$$V_L = \sqrt{(E(1-\mu))/(\rho(1+\mu)(1-2\mu))} \quad (1)$$

$$V_T = \sqrt{G/\rho} \quad (2)$$

$$V_L/V_T = \sqrt{(2\mu-2)/(2\mu-1)} \quad (3)$$

A partir de substituições algébricas, é possível obter diretamente essas constantes elásticas em função das medidas da velocidade da onda ultrassônica, forma mais utilizada e apresentada nas equações de 4, 5 e 6 [3].

$$\mu=0,5. \frac{V_L^2 - 2.V_T^2}{V_L^2 - V_T^2} \quad (4)$$

$$E = \rho. \frac{3.V_T^2 . V_L^2 - 4.V_T^4}{V_L^2 - V_T^2} \quad (5)$$

$$G = \rho. V_T^2 \quad (6)$$

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais e Equipamentos

Foram utilizados 2 lotes de pastilhas de alumina fabricadas em prensa uniaxial de ação simples:

10 pastilhas de alumina pura com densidades em torno de 92% e 10 pastilhas com densidades em torno de 96%.

As dimensões médias das pastilhas são de aproximadamente \varnothing 9,0 mm e aproximadamente 8,97 mm de altura.

Foram utilizados um aparelho emissor-receptor de pulso ultra-sônico da Panametrics Epoch Plus, transdutores de onda longitudinais e transversais de 5,0MHz Panametrics e um acoplante da Couplant, aplicado entre as pastilhas.

A obtenção do sinal ultrassônico foi realizado a uma temperatura em torno de 23 a 25°C com um osciloscópio DPO 3032 da Tektronix, Figuras 3 e 4.

2.2 Metodologia

Nesse trabalho foi usado o método de transmissão, a onda ultrassônica emitida pelo transdutor emissor percorre o material, a pastilha de alumina, e é recebida pelo transdutor receptor. O tempo de percurso da onda ultrassônica é o tempo decorrido

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

entre o pulso de saída e o de chegada e é função da altura da pastilha de alumina (espaço percorrido pela onda ultrassônica) e de sua estrutura interna (como por ex. vazios, tamanho de grãos etc..).

Para a medida do tempo de percurso da onda ultrassônica os dois transdutores (emissor e receptor) foram colocados em contato (sem o material entre eles) de maneira a gerar um sinal de referência. Um dos cursores do osciloscópio foi posicionado no pico máximo desse sinal, sendo usado como referência para as medidas de tempo. Com a colocação da pastilha entre os transdutores é gerado um novo sinal, deslocado em relação ao anterior (referência). Com o outro cursor do osciloscópio posicionado desse novo sinal é obtido, diretamente no osciloscópio, o tempo de percurso da onda ultrassônica para aquela pastilha de alumina.

Usando a metodologia descrita acima foram medidos os tempos de percurso de ondas ultrassônicas longitudinais e cisalhantes em 20 pastilhas de alumina, 10 pastilhas com densidade de 92% e 10 com densidade de 96%, da densidade máxima. Cada pastilha teve o tempo medido 10 vezes.

A partir da média do tempo de percurso medido para cada grupo de pastilha (92% e 96%) e da média de suas alturas foram obtidas as velocidades das ondas longitudinal e cisalhante para a alumina com 92 e 96% de densidade.

Substituindo essas velocidades medidas nas equações 4, 5 e 6 foram calculadas as respectivas constantes elásticas do Al_2O_3 nessas duas faixas de porosidade.



Figura 3: Esquema de transdutores longitudinais sendo utilizados no modo transmissão.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

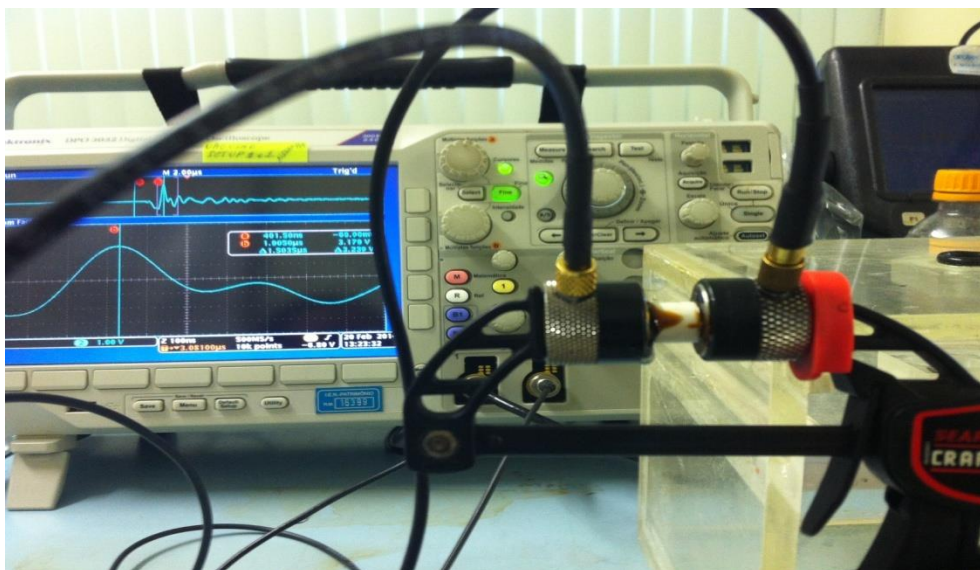


Figura 4: Esquema de transdutores transversais sendo utilizados no modo transmissão.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são mostrados, Tabela 1, os valores médios medidos nas 20 pastilhas, de densidade, de tempo de percurso das ondas ultrassônicas longitudinal e transversal, e de suas alturas. A média dos desvios padrões do processo de aquisição do tempo são 2,65 para pastilha de 92% no sentido transversal e 2,23 no sentido longitudinal. Para as pastilhas de 96% foi de 2,51 no sentido transversal e 2,49 no sentido longitudinal. Também, são apresentadas as velocidades da onda ultrassônica longitudinal e cisalhante, calculadas a partir desses dados, para os dois grupos de pastilhas. Finalmente, a tabela oferece os valores das constantes elásticas para alumina com 92% e 96% de densidade, obtidas através das equações (4), (5) e (6).

Tabela 1: Valores médios de densidade e altura das pastilhas de alumina e do tempo de percurso das ondas ultrassônicas. Velocidades ultrassônicas obtidas na alumina de diferentes porosidades e suas constantes elásticas.

%DT	ρ (g/cm ³)	Tempo (ns)	Altura (mm)	V_T (m/s ²)	V_L (m/s ²)	μ	E (GPa)	G(GPa)
92	3,71	1719,76	8,97	5219,15	-	0,2859	259	101
92	3,71	941,06	8,97	-	9532,06			
96	3,83	1541,27	8,97	5822,03	-	0,2556	326	130
96	3,83	882,84	8,97	-	10160,79			

Segundo Yoshimura [5], os valores das propriedades da alumina para porosidade zero, determinados pela média dos três ajustes, foram: velocidade sônica longitudinal, $V_L = 11225 \pm 208$ m/s; velocidade sônica transversal, $V_T = 6576 \pm 96$ m/s; coeficiente de Poisson, $\mu = 0,241 \pm 0,005$; módulo de Young, $E = 421 \pm 18$ GPa; módulo de cisalhamento, $G = 171 \pm 8$ GPa. Tomando como referência os valores de velocidade da onda ultrassônica na alumina, obtidos por Yoshimura, pode-se inferir que as medidas obtidas nesse trabalho estão de acordo com as medidas verificadas na literatura. Observe que a diferença de velocidade da onda ultrassônica cisalhante entre 92% e 96%, obtida nesse trabalho, é de 603 m/s. Para essa mesma onda a diferença de velocidade entre 96% (obtido nesse trabalho) e 100% (obtido por Yoshimura) é de 754 ± 96 m/s, variações da mesma ordem de grandeza. Essas variações de tempo observadas, para porosidades variando 4%, indicam um comportamento linear da velocidade da onda ultrassônica em função da porosidade, o que é esperado segundo a literatura [6]. O mesmo comportamento é verificado no caso das

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

ondas longitudinais. Isso indica que a metodologia de medida de tempo de percurso da onda ultrassônica aplicada nesse trabalho é adequada.

Abaixo, Tabela 2, são apresentados valores de módulo de Young, módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson obtidos em alumina de diferentes densidades, para fins de comparação com aqueles obtidos nesse trabalho. Os resultados desse trabalho foram obtidos por ultrassom em material com densidades de 92% e 96%. Da literatura, são apresentados resultados de Yoshimura [5], também obtidos por ultrassom mas com densidade 100%, e da *The American Ceramic Society* [6], para densidades de 85% e 94%, mas obtidos pelo processo convencional, a partir de ensaios mecânicos. Essa comparação mostra que os resultados desse trabalho estão coerentes mesmo considerando diferentes procedimentos para a obtenção dessas constantes e desconhecendo possíveis diferenças da alumina de origem usadas pelos experimentadores (por ex. granulometria e pureza).

Tabela 2: Comparativo das constantes elásticas da literatura e dos valores obtidos experimentalmente (92% e 96%).

DENSIDADE RELATIVA (ρ)	E (GPa)	G (GPa)	μ
85	220	90	0,22
92	259	101	0,29
94	277	117	0,21
96	326	130	0,26
100	421	171 165*	0,24

(*)Módulo de Cisalhamento obtido em alumina 100% a partir de ensaios mecânicos pela American Ceramic Society. (Coors Porcelain Data Sheet 0001, August 1964) – in Table 9 Alumina as a Ceramic Material.

Os resultados preliminares obtidos nesse trabalho, indicam que a técnica ultrassônica pode ser usada para a obtenção das constantes elásticas em pastilhas de alumina de 92% e 96% de densidade. Em continuidade a esse estudo é importante a investigação de medidas dessas constantes dentro desse intervalo, porém com outras faixas de densidade (por ex. 93, 94 e 95%), bem como realizar medições ultrassônicas para a obtenção das constantes elásticas em corpos de prova cerâmicos em que seja possível, mecanicamente, obter essas mesmas constantes elásticas e dessa forma aferir o método ultrassônico. Após aprofundamento desse estudo será possível afirmar que essa técnica não destrutiva poderá ser aplicada em pastilhas de UO_2 .

4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nesse trabalho mostraram que a técnica de medida do tempo de percurso da onda ultrassônica empregada é adequada para a caracterização das constantes elásticas de materiais cerâmicos. As comparações com resultados encontrados na literatura indicaram que as constantes elásticas obtidas em pastilhas de alumina, com 92% e 96% de densidade, são coerentes e a técnica não destrutiva por ultrassom pode ser empregada com segurança para a determinação de constantes elásticas em materiais cerâmicos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP), ao Instituto de Engenharia Nuclear (IEN/CNEN) e a Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ) por todo o apoio prestado.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

REFERÊNCIAS

- 1 Perrota JA. Curso de Difusão Nuclear; USP; Julho 2012.
- 2 Lamarsh JR. Introduction to Nuclear Engineer, 3^o Edição, Addison-Wesley Publishing Co.1982 , New York, USA .
- 3 ANSI/ASTM. ASTM E 494. Standard Recommended for Measuring Ultrasonic Velocity in Practice Materials, Philadelphia.1995: 11p.
- 4 Baroni DB. Desenvolvimento de Técnica Ultra-sônica para medida de porosidade em pastilhas de UO₂ [mestrado]. Instituto de engenharia Nuclear, Rio de Janeiro.
- 5 Yoshimura HN, Molinasi AL, Siqueira GR, Camargo AC, Narita NE, Cesar PF. Efeito da porosidade nas propriedades mecânicas de uma alumina de elevada pureza. Associação Brasileira de Cerâmica, 2005; 51: 239-251.
- 6 Alumina as a Ceramic Material. The American Ceramic Society-Special Publication, Mechanical Proprieties of Alumina. 1964; 4: 46

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.