

# CARACTERIZAÇÃO DE ESPUMA POLIMÉRICA PARA USO EM EMBALAGENS PARA TRANSPORTE DE REJEITOS RADIOATIVOS

Rogério Pimenta Mourão\* e Miguel Mattar Neto\*\*

\*Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear  
Comissão Nacional de Energia Nuclear  
Caixa Postal 941  
30.550-330 Belo Horizonte, MG  
[mouraor@urano.cdtm.br](mailto:mouraor@urano.cdtm.br)

\*\*Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares  
Comissão Nacional de Energia Nuclear  
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária  
05508-900 São Paulo, SP  
[mmattar@net.ipen.br](mailto:mmattar@net.ipen.br)

## RESUMO

Os amortecedores de impacto são estruturas de sacrifício largamente utilizadas na proteção de embalagens para o transporte de rejeitos radioativos contra danos provenientes de quedas, fogo e objetos pontiagudos. Vários materiais são empregados como enchimento de amortecedores, entre eles madeira, cimento expandido e espumas poliméricas. Um dos materiais mais comumente empregados é a espuma de poliuretano rígida obtida do petróleo, devido a sua boa capacidade de absorção e dissipação de energia, trabalhabilidade, baixo peso específico, baixo custo e disponibilidade comercial. No Brasil, foi desenvolvida uma espuma alternativa, obtida a partir do óleo de mamona, que, além utilizar fonte renovável, dispensa o uso de CFC em seu processamento. Para se obter o melhor desempenho desta espuma, é necessário conhecer-se detalhadamente suas propriedades físicas e mecânicas. As informações sobre as espumas poliméricas petroquímicas já se encontram na literatura e em catálogos de fornecedores, porém não se tem notícia de um estudo similar feito para espumas oriundas da mamona. Este trabalho apresenta o programa de ensaios realizado como parte do desenvolvimento de uma embalagem para transporte de rejeitos radioativos. Os resultados obtidos mostram que a espuma da mamona apresenta comportamento mecânico similar ao das espumas petroquímicas, com boa homogeneidade e reprodutibilidade das propriedades.

Keywords: testing, packages, polymeric foams, transportation, nuclear applications

## I. INTRODUÇÃO

Uma das etapas mais críticas da gerência de rejeitos radioativos é o transporte deste material das instalações onde são gerados para os locais de tratamento e armazenamento temporário e daí para o repositório final. Isto porque, sendo uma das poucas atividades da indústria nuclear realizadas fora de áreas controladas, o transporte apresenta um risco potencial de acidente durante o seu trajeto. Algumas embalagens, licenciadas para o transporte de quantidades ilimitadas de materiais radioativos, são projetadas para resistirem a acidentes severos, como quedas de grande altitude, incêndios, submersão em água e impacto contra objetos pontiagudos [1]. Para obter embalagens confiáveis, a indústria nuclear e a comunidade científico-tecnológica mundial têm investido grande esforço de

pesquisa e desenvolvimento, no projeto de sistemas de transporte, incluindo a incorporação dos novos materiais que vêm surgindo a cada ano.

Nesta linha, uma das áreas pesquisadas é o uso de amortecedores de impacto com alma de material celular. Amortecedores são componentes de sacrifício que, adicionados externamente às embalagens, absorvem e dissipam energia em eventos de queda e, em caso de incêndio, atuam como barreira térmica entre o fogo e a embalagem a ser protegida. Várias concepções de amortecedores têm sido propostas pelos pesquisadores e também diferentes materiais de enchimento, como materiais celulares, madeira natural ou aglomerada, concreto leve e espumas metálicas e poliméricas.

Uma configuração muito promissora é aquela constituída por um amortecedor com casca metálica externa

fina e alma de espuma de poliuretano. As vantagens apresentadas por este arranjo são: facilidade de confecção, pequeno peso específico, propriedades mecânicas aproximadamente constantes em todas as direções para algumas densidades (isto é, baixa anisotropia), disponibilidade de matéria prima, baixo custo e boa resistência ao fogo.

No Brasil, foi desenvolvida uma espuma de poliuretano utilizando matéria-prima extraída do óleo de mamona (*Ricinus comunis*), em substituição aos produtos da indústria petroquímica. Esta espuma tem a grande vantagem de ser um produto acessível localmente e ser oriundo de fonte renovável e não poluente. Contudo, não se tem notícia de nenhum estudo sobre as propriedades físicas ou mecânicas deste material, fundamentais para sua utilização como elemento estrutural. Para preencher esta lacuna, foi conduzido um programa de ensaios visando sua caracterização.

## II. DESCRIÇÃO DO MATERIAL

As espumas de poliuretano pertencem à categoria dos materiais celulares, denominação dada aos materiais bifásicos formados por um arranjo espacial de arestas e membranas sólidas interconectadas, que encerram um fluido, geralmente o ar, em seus interstícios. A unidade básica desta estrutura é denominada *célula*, cujas dimensões variam de algumas centenas de micra até alguns milímetros. Essa disposição confere a este material características muito interessantes sob o ponto de vista estrutural, como baixo peso específico, eficiente isolamento térmico e alta capacidade de absorção e dissipação de energia durante eventos de impacto. Os materiais celulares podem ser encontrados na natureza — esponjas, corais, madeira, cortiça e ossos são alguns exemplos — bem como produzidos artificialmente, quando encontram vasta aplicação em diversos campos da atividade humana. Diversos materiais sólidos podem servir de base para a fabricação de materiais celulares, como metais, vidros, cerâmicas e polímeros.

A espuma de poliuretano é obtida pela reação química controlada entre dois componentes principais, um isocianato e um polioliol, sendo este último, no caso da espuma estudada neste trabalho, sintetizado a partir do óleo de mamona. Uma vez colocados em contato, ocorre entre estes componentes uma rápida reação exotérmica e, devido à absorção do ar ambiente, a mistura apresenta uma expansão volumétrica que pode chegar a quase dez vezes seu volume original. Se a expansão for restringida lateralmente, a mistura crescerá apenas em uma direção, denominada direção paralela ao crescimento. As direções normais a esta são denominadas direções perpendiculares ao crescimento, observando-se, como se mostrará adiante, que espumas de determinadas densidades não são isotrópicas, com sua rigidez variando ortogonalmente.

A microestrutura da espuma estudada neste trabalho é mostrada nas Figs. 1 a 3. Observa-se na Figura 1 que as

células têm formato aproximadamente esférico e conectam-se com várias de suas vizinhas. Para a densidade mostrada —  $165 \text{ kg/m}^3$ , o tamanho médio das células é de aproximadamente  $150 \mu\text{m}$ . Nas Figs. 2 e 3 é feita uma comparação entre o tamanho das células de espumas de duas densidades, observando-se que, quanto maior a densidade da espuma, menor o tamanho médio de suas células.

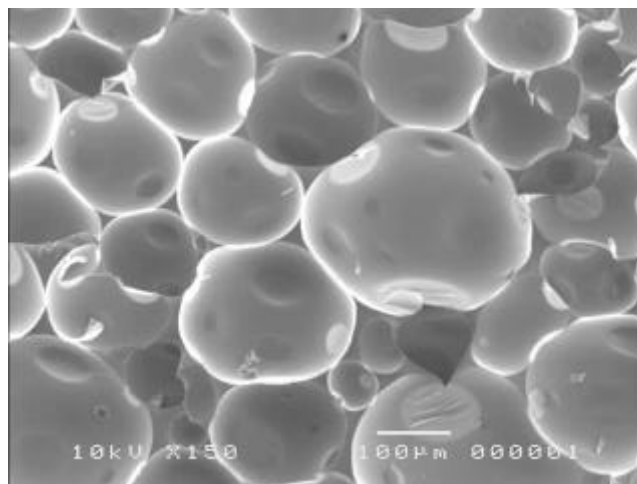


Figura 1. Microestrutura da espuma usada, densidade  $165 \text{ kg/m}^3$  (aumento: 150 x)

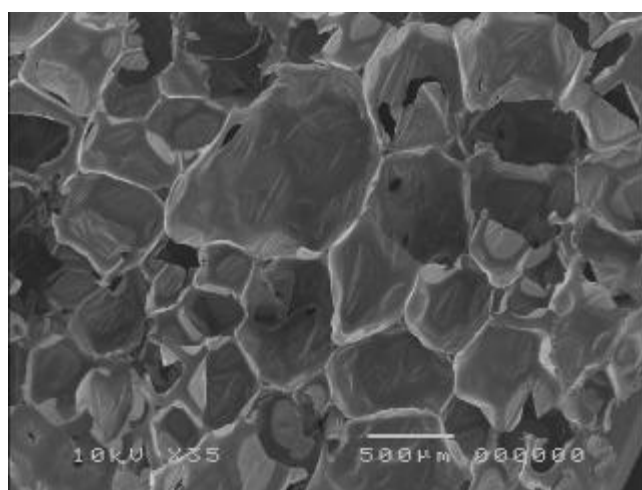


Figura 2. Microestrutura da espuma de poliuretano, densidade  $44 \text{ kg/m}^3$  (aumento: 35 x)

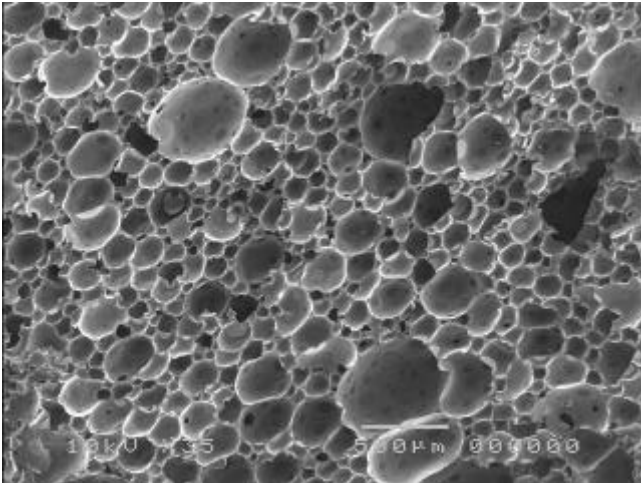


Figura 3. Idem, densidade  $220 \text{ kg/m}^3$  (aumento: 35 x)

O comportamento macroscópico das espumas poliméricas, quando submetidas à compressão, é resultante da estrutura que se acabou de descrever. A Figura 4 apresenta uma curva tensão-deformação típica, na qual três fases bem distintas podem ser observadas. Inicialmente há uma região de deformação elástica, na qual as arestas das células sofrem flexão ou flambagem elástica, da qual se recuperam totalmente quando da retirada da carga. Também nesta fase, a distensão experimentada pelas membranas das células se situa no limite de elasticidade do polímero base, não ocorrendo ruptura do material. Se a solicitação aumenta, as arestas e membranas começam a sofrer colapso plástico, as células começam a desaparecer enquanto elementos individualizados e a espuma se adensa rapidamente. Esta fase é caracterizada por um longo platô na curva tensão-deformação, no qual a espuma se deforma de forma significativa sem praticamente nenhum aumento de tensão. Observou-se que, dependendo da densidade da espuma, pode ocorrer encruamento plástico nesta etapa, caracterizado pela inclinação da curva nesta região. A tensão média nesta região –  $\sigma_p$  – é denominada tensão de platô, sendo um parâmetro importante para caracterização da espuma. Na terceira fase, comumente denominada *região de adensamento*, a tensão aumenta rapidamente sem que haja grande incremento de deformação, uma vez que, como grande parte das células já colapsou, o próprio material do polímero base começa a ser comprimido, o que provoca o aumento rápido da resistência da espuma. A determinação da deformação  $\epsilon_p$ , que marca a transição entre as duas últimas regiões da curva  $\sigma$ - $\epsilon$  é comumente feita de duas maneiras. Na primeira, toma-se como  $\epsilon_p$  o valor de deformação correspondente a 1,5 vezes  $\sigma_p$  e na segunda, traça-se a tangente à curva  $\sigma$ - $\epsilon$  a partir da origem do gráfico e determina-se o valor de deformação correspondente ao ponto de tangência.

É de se notar que, como em qualquer gráfico tensão-deformação, a área abaixo da curva representa a energia absorvida específica pela espuma durante a deformação.

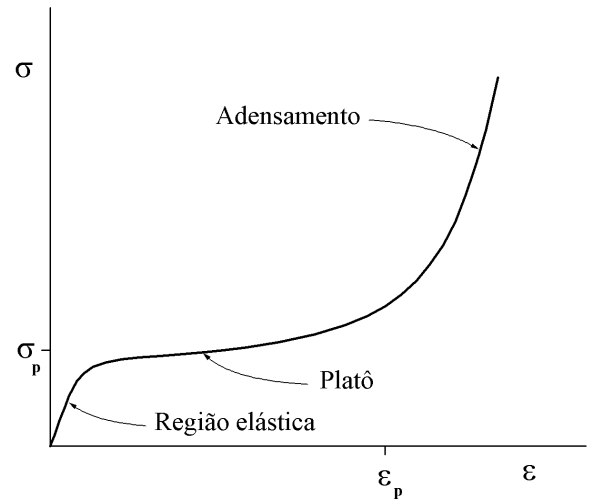


Figura 4. Curva tensão-deformação para uma espuma polimérica rígida

### III. PROGRAMA DE ENSAIOS

Estabeleceu-se que os seguintes parâmetros seriam determinados através do programa de ensaios: módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, energia absorvida específica, módulo de expansão volumétrica, tensão de platô e deformação máxima de platô (antes do início do adensamento).

O programa experimental consistiu de ensaios de compressão uniaxial a baixa velocidade, de compressão hidrostática e de impacto. Os dois primeiros foram realizados em máquina universal de tração/compressão e o último em instalação para teste de impacto vertical.

**Ensaio de Compressão Uniaxial.** O ensaio de compressão uniaxial foi realizado de acordo com a norma ASTM-D-1621, “Compressive strength of rigid cellular plastics” [2]. As amostras consistiram de blocos de seção transversal quadrada de 50 mm de lado e altura de 60 mm. A fim de estudar-se a variação das propriedades do material com a densidade, foram ensaiados corpos de prova com densidades que permitissem um tratamento estatístico adequado dos parâmetros obtidos, tornando significativas as interpolações e extrapolações feitas. Assim, foram ensaiadas espumas com densidades de 41, 60, 87, 147, 253 e  $326 \text{ kg/m}^3$ .

Desejando-se também conhecer a influência da taxa de compressão sobre a resposta da espuma, foram realizados ensaios com três taxas de deformação:  $\dot{\epsilon} = 1,4 \times 10^{-3}$ ,  $2,8 \times 10^{-3}$  e  $5,6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , correspondentes às velocidades da máquina de ensaios de 5, 10 e 20 mm/min. Alguns poucos ensaios foram realizados com a taxa de deformação de  $1,4 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  (50 mm/min), mas logo se percebeu que os mecanismos de acionamento da máquina estavam sendo mecanicamente sobrecarregados e esta tentativa foi abandonada.

Por fim, para avaliar-se o grau de anisotropia da espuma, foram testadas amostras retiradas nas direções paralela e perpendicular ao crescimento da espuma.

**Ensaio Hidrostático.** Não se encontrou na literatura consultada nenhuma referência sobre normalização do ensaio de compressão hidrostática. Adotou-se neste trabalho o método seguido por Zhang [3], no qual a amostra é colocada em uma câmara de compressão provida de pistão com anel de vedação, a qual é colocada na base da máquina de tração/compressão, sendo o pistão acionado pelo cabeçote da máquina (Figs. 5 e 6). O interior da câmara é totalmente preenchido por água e os corpos de prova – idênticos aos usados nos ensaios de compressão uniaxial – são previamente impermeabilizados, revestindo-os com bolsas de látex. Antes do fechamento das bolsas, o ar neles contido é sugado com auxílio de uma bomba de vácuo, para diminuir o efeito pneumático durante a deformação. As densidades testadas foram 44, 56, 108, 143 e 261 e 326  $\text{kg/m}^3$ , algumas diferentes das anteriores, mas igualmente representativas em termos estatísticos. As taxas de deformação volumétrica aplicadas foram 0,0045; 0,0090 e 0,0180  $\text{s}^{-1}$ , correspondentes às velocidades de cabeçote de 5, 10 e 20 mm/s.



Figura 5. Câmara de pressão usada no ensaio hidrostático



Figura 6. Montagem da câmara na máquina universal.

**Ensaio de Impacto.** O ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM-D-1596 “Shock-absorbing characteristics of package-cushioning materials” [2]. Os corpos de prova consistiram de blocos de seção transversal quadrada de 100 mm de lado e altura de 25,4 mm, retirados nas direções paralela e perpendicular ao crescimento da espuma. As densidades ensaiadas foram 44, 60, 108, 165, 229 e 277  $\text{kg/m}^3$ .

Os ensaios foram realizados em uma instalação consistindo de torre tubular com guias, altura total de 3,5 m, tendo base rígida para impacto, gatilho de liberação de cargas e carrinho de impacto vertical, de peso ajustável, ao qual se acoplou uma célula de carga.

O ensaio consiste em liberar-se o carrinho de uma altura pré-determinada sobre a amostra colocada sobre a base da estrutura, variando-se o peso do carrinho e a altura de queda. A Tabela 1 apresenta as combinações de peso e altura usados na campanha de testes.

Tabela 1. Parâmetros do ensaio de impacto

Densidade ( $\text{kg/m}^3$ )	Peso carrinho (kg)	Altura queda (m)	Taxa deformação ( $\text{s}^{-1}$ )
44	19,4	0,56	130
60	19,4	0,57	132
		0,65	141
		0,73	149
108	48,45	1,20	191
165	43,45	1,94	243
229	43,45	2,11	253
		2,27	263
		3,32	318
277	48,45	3,32	318

Como a massa do carrinho era conhecida em cada ensaio, as acelerações foram determinadas diretamente das forças captadas pelo sistema eletrônico acoplado à célula de carga.

#### IV. RESULTADOS OBTIDOS

**Ensaio de Compressão Uniaxiais.** O gráfico da Figura 7 apresenta as curvas tensão-deformação dos ensaios de compressão uniaxial para todas as densidades testadas. Seguindo-se as recomendações da norma adotada, ASTM-D-1621, pelo menos cinco corpos de prova foram ensaiados para cada densidade. A Figura 8 mostra apenas as curvas correspondentes às densidades mais baixas, para melhor visualização de sua forma.

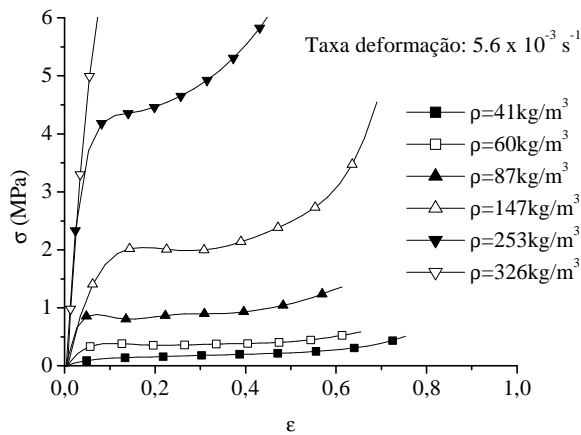


Figura 7. Curvas obtidas no ensaio de compressão uniaxial (todas as densidades)

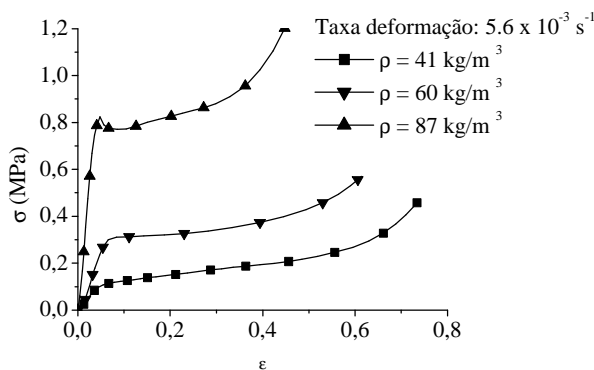


Figura 8. Idem, apenas as densidades baixas

Constatou-se que, de modo geral, a espuma do óleo de mamona apresenta comportamento similar àquele das espumas da indústria petroquímica, no caso de resistência à compressão. Esta constatação é bastante relevante ao

lembrar-se que este é um programa de desenvolvimento de um material ainda não pesquisado anteriormente sob o ponto de vista estrutural.

Com relação aos parâmetros específicos, constatou-se que o módulo de elasticidade  $E$ , a tensão de platô  $\sigma_p$ , a energia absorvida específica  $U$  e o coeficiente de Poisson  $\nu$  aumentam com a densidade da espuma (Figs. 9 a 12). O módulo de elasticidade é determinado pela inclinação média da região elástica da curva  $\sigma$ - $\epsilon$ , ao passo que a tensão de platô é tomada como o valor médio de tensão no platô de plastificação. A energia absorvida específica  $U$ , como dito anteriormente, é dada pela área sob a curva  $\sigma$ - $\epsilon$ .

O módulo de expansão volumétrico  $K$  é dado por

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}, \quad (1)$$

sendo sua variação, portanto, similar à do módulo de elasticidade.

A deformação máxima de platô  $\epsilon_p$  apresentou grande variação com a densidade, como pode ser inferido das Figs. 7 e 8. As espumas de densidades menores apresentam um platô bastante longo, e, portanto, maiores valores de  $\epsilon_p$ .

Para efeitos de comparação, os valores obtidos foram confrontados com aqueles obtidos por Goods et al, em um estudo visando a caracterização de uma espuma da indústria petroquímica confeccionada a partir de uma formulação nova [4]. Na caixa de texto das Figs. 9 e 10, são mostradas as aproximações exponenciais obtidas por Goods e no presente estudo. Quanto à energia absorvida específica (Figura 11), o valor obtido para a espuma de densidade 253 kg/m<sup>3</sup> coincidiu com aquele apresentado por Goods para a espuma por ele estudada, de densidade 240 kg/m<sup>3</sup>: 0,39 J/cm<sup>3</sup> para a deformação  $\epsilon = 0,1$ .

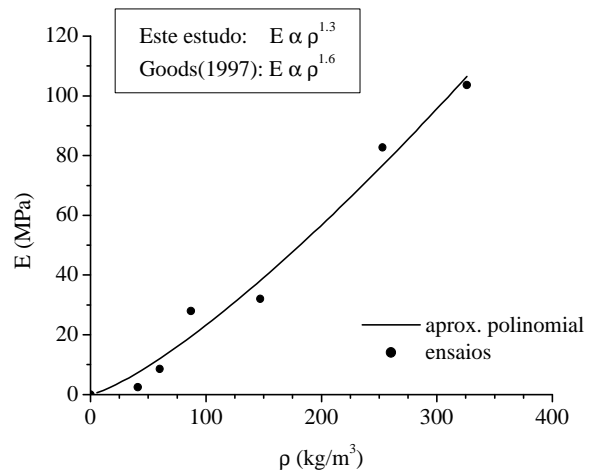


Figura 9. Variação do módulo de elasticidade com a densidade

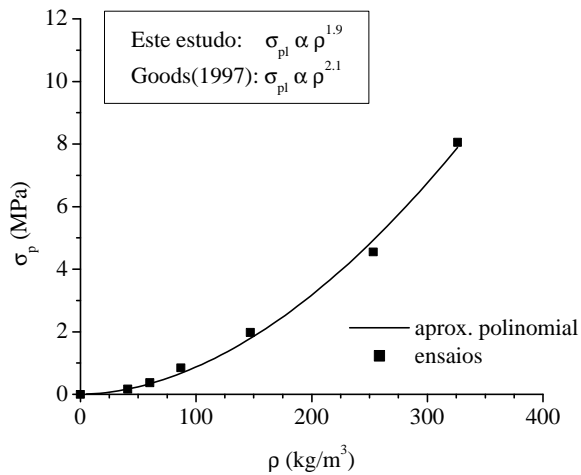


Figura 10. Variação da tensão de platô com a densidade

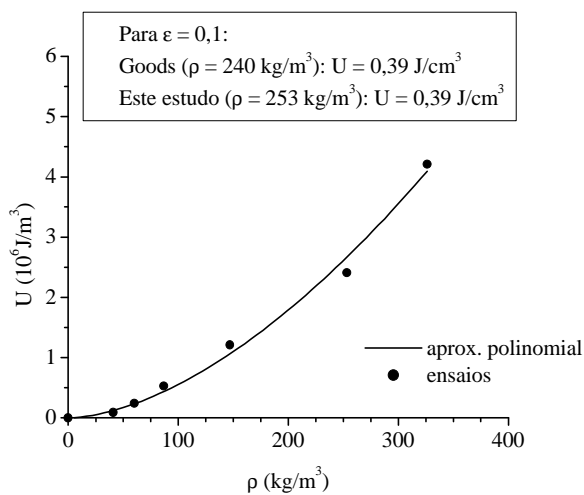


Figura 11. Variação energia absorvida específica com a densidade

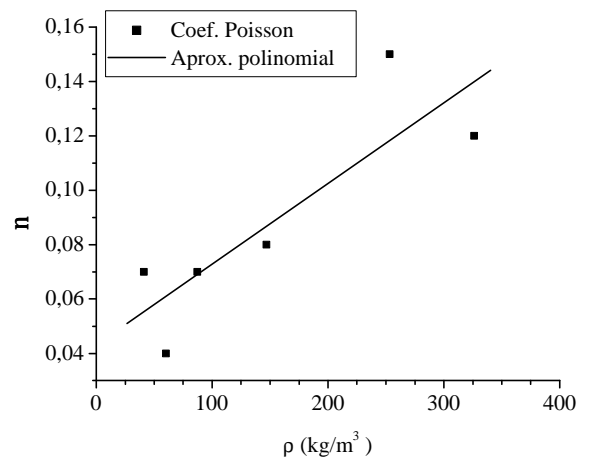


Figura 12. Variação coeficiente de Poisson com a densidade

As Figs. 13 e 14 apresentam os resultados obtidos na verificação do grau de isotropia da espuma. Observa-se que, para espumas de densidade baixa e média (até aproximadamente  $200 \text{ kg/m}^3$ ), a energia absorvida específica  $U$  e a tensão de platô  $\sigma_p$  são maiores na direção do crescimento da espuma; já as espumas de densidades superiores apresentam maior rigidez e capacidade de absorção de energia na direção perpendicular ao crescimento.

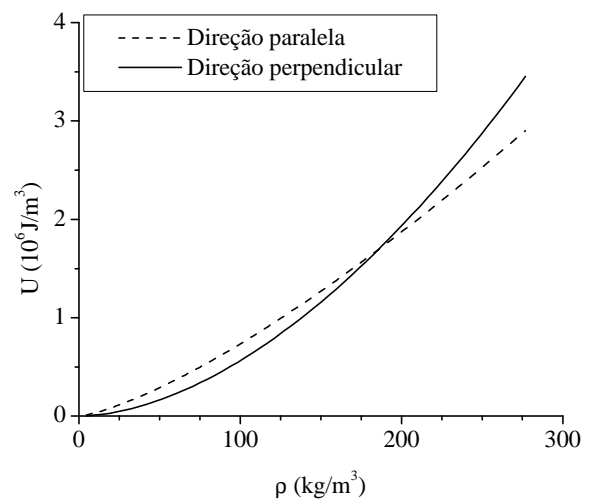


Figura 13. Variação da capacidade de absorção de energia segundo a direção de aplicação da carga

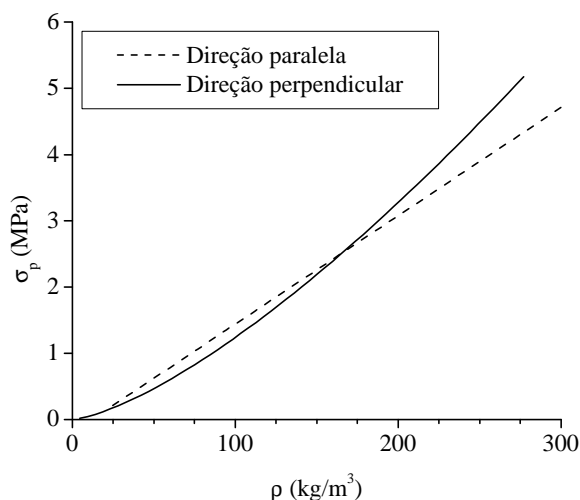


Figura 14. Variação da tensão de platô segundo a direção de aplicação da carga

**Ensaio Hidrostáticos.** De maneira similar aos ensaios de compressão uniaxial, observou-se que o mecanismo de deformação volumétrica se dá em três fases bem caracterizadas: uma região elástica inicial, onde a deformação é linearmente proporcional à pressão, um platô de plastificação, onde ocorre grande parte da deformação plástica sem que haja grande aumento da pressão aplicada e, finalmente, uma região de adensamento (Figs. 15 e 16).

A espuma de densidade mais alta –  $326 \text{ kg/m}^3$  – teve um comportamento inicial atípico, apresentando até a deformação de  $\epsilon_v = 0,20$  uma resistência à compressão volumétrica menor do que a espuma de densidade  $261 \text{ kg/m}^3$ . Este fenômeno deverá ser mais bem explorado, com a realização de ensaios confirmatórios para esta densidade.

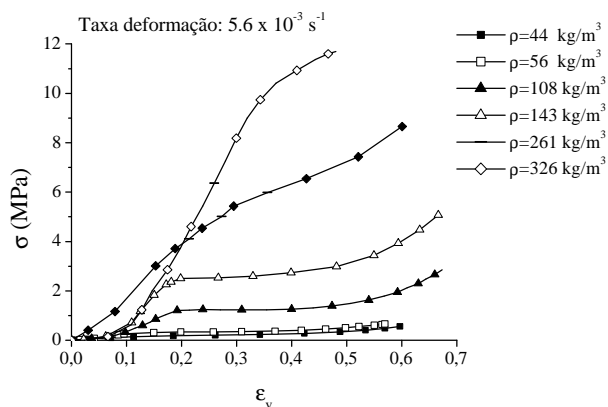


Figura 15. Curvas pressão-deformação volumétrica (todas as densidades)

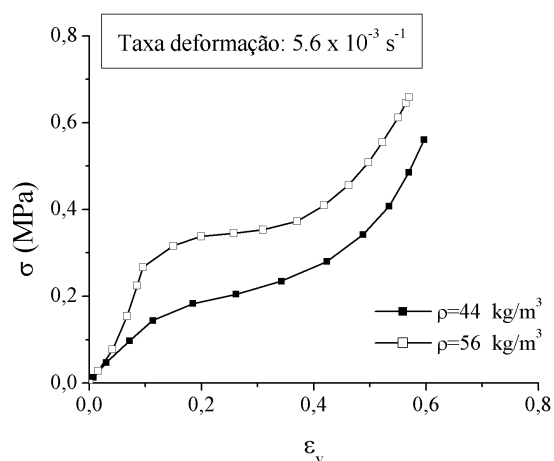


Figura 16. Idem, densidades baixas.

**Ensaio de Impacto.** As Figs. 17 e 18 apresentam as curvas obtidas no ensaio de impacto. A grande semelhança com os gráficos dos ensaios anteriores indica que os mesmos mecanismos ditam o comportamento da espuma testada tanto em situações de esforços quase estáticos quanto dinâmicos. Nota-se, contudo, que algumas curvas apresentam uma visível oscilação, o que é esperado em eventos dinâmicos de curta duração.

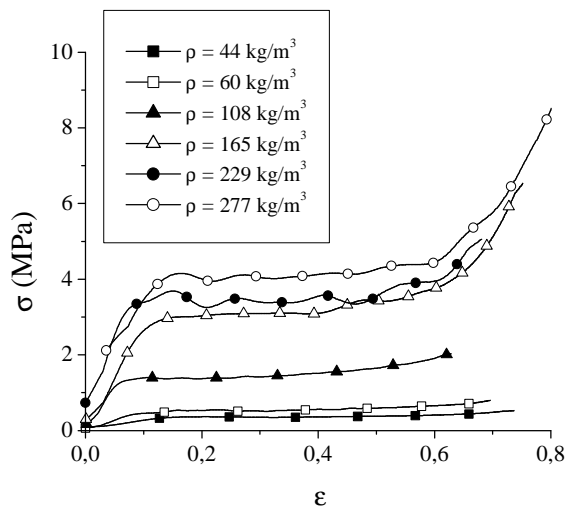


Figura 17. Resultados dos ensaios de impacto (todas as densidades)

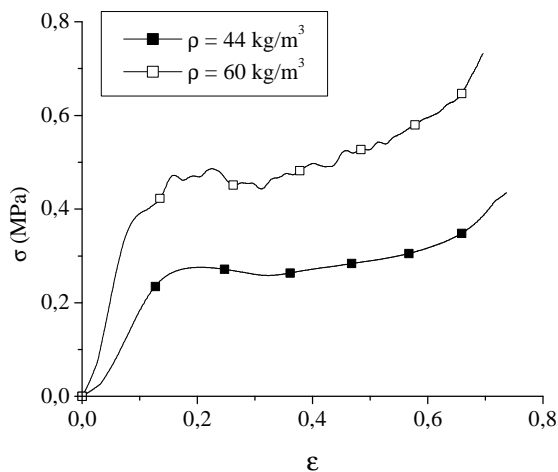


Figura 18. Idem, apenas densidades baixas

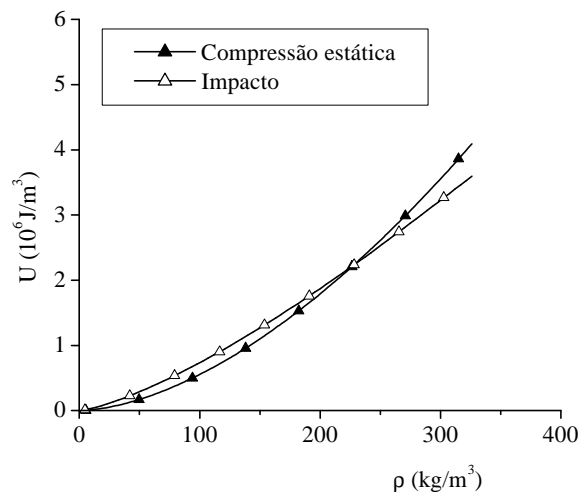


Figura 20. Idem, direção paralela

Comparação entre as Respostas Estática e Dinâmica. Uma análise comparativa foi feita entre os resultados dos ensaios de compressão quase estáticos e de impacto, tomando-se como parâmetro de comparação a capacidade de absorção de energia. Observa-se nas Figs. 19 e 20 que, quando comprimidas na direção perpendicular ao crescimento, a espuma absorve mais energia durante o impacto do que quando deformadas a baixa velocidade. Contudo, quando a solicitação se dá na direção paralela, isto se verifica somente até a densidade aproximada de  $230 \text{ kg/m}^3$ . Acima deste valor, a situação se inverte, passando a espuma a absorver mais energia quando comprimida a baixas velocidades.

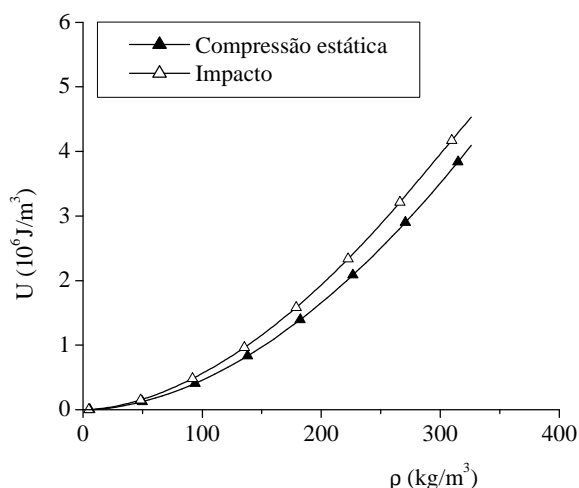


Figura 19. Energia absorvida específica (direção perpendicular)

## V. CONCLUSÕES

A principal conclusão da campanha de ensaios realizada é que o comportamento mecânico da espuma de poliuretano à base do óleo de mamona sob compressão estática, dinâmica e hidrostática é semelhante ao das espumas tradicionais obtidas a partir do petróleo. As curvas tensão-deformação obtidas apresentam as mesmas três fases características (elástica, platô de deformação e adensamento) e seus parâmetros principais (módulo de elasticidade, energia absorvida específica e tensão de plastificação) têm a mesma ordem de grandeza.

A caracterização desta espuma é uma das etapas de uma metodologia desenvolvida para permitir o uso otimizado de materiais poliméricos como proteção de embalagens de transporte de rejeitos radioativos. Esta metodologia inclui ainda o uso de métodos simplificados para escolha da densidade mais apropriada, simulação numérica pelo método dos elementos finitos e sua validação através da realização de testes de impacto com uso de protótipos em escala real.

## REFERÊNCIAS

- [1] Comissão Nacional de Energia Nuclear. CNEN-NE-5.01: Transporte de Material Radioativo. Rio de Janeiro, julho 1988.
- [2] American Society for Testing and Materials, EUA. 1990 Annual Book of ASTM Standards, v. 08.01, 15.03, 15.09, 1990.
- [3] Zhang, J. Constitutive Modeling and Optimal Design of Polymeric Foams for Crashworthiness. Tese (Doutorado

**em Engenharia Mecânica). University of Michigan, Ann Arbor, EUA, 1998.**

**[4] Goods, S. H. et al. Mechanical Properties and Energy Absorption Characteristics of a Polyurethane Foam. (SAND-87-8490). Albuquerque: Sandia National Laboratories, March 1997.**

#### **ABSTRACT**

Impact limiters are sacrificial components widely used to protect radioactive waste packages against damage arising from falls, fires and collisions with protruding objects. Several materials have been used as impact limiter filling: wood, expanded cement and polymeric foams. One of the most popular materials among package designers is the petroleum rigid polyurethane foam, owing to its toughness, workability, low specific weight, low costs and commercial availability. In Brazil, a new foam was developed using the polymer extracted from the castor-oil plant (*Ricinus communis*), a renewable source. Besides, no greenhouse gases are used during its manufacture. For a better performance, a detailed knowledge of the foam physical and mechanical properties is essential. A relatively vast amount of data about regular polymeric foams can be found in the literature and in several manufacturers' brochures, but no data has been published so far about the properties of the castor-oil foam. This paper presents the testing program carried out as part of ongoing research program aimed at developing a packaging for the transport of radioactive wastes. The results obtained reveal that the castor-oil foam has a mechanical behavior similar to that of regular foams, with good property reproducibility and homogeneity.