

DESENVOLVIMENTO DE AMORTECEDOR DE IMPACTO PARA EMBALAGENS PARA TRANSPORTE DE MATERIAL RADIOATIVO - CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL POLIMÉRICO UTILIZADO

Rogério Pimenta Mourão* e Miguel Mattar Neto**

*Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
Comissão Nacional de Energia Nuclear
E-mail: mouraor@urano.cdtm.br

**Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Comissão Nacional de Energia Nuclear
E-mail: mmattarnet.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 amortecedor, entre eles a madeira, colmeia de alumínio e espumas metálicas ou poliméricas. Existem também amortecedores de impacto ocultos, que podem ser um arranjo de tubos ou uma casca metálica. Um dos materiais mais comumente empregados é a espuma de poliuretano rígida, devido a sua boa tenacidade, trabalhabilidade, baixo peso específico, custo compatível e disponibilidade comercial. No Brasil, foi desenvolvida uma espuma obtida a partir do óleo de mamona (*Ricinus communis*), sendo um material candidato para o uso acima descrito. Para obter-se o melhor desempenho desta espuma, reduzindo-se inclusive suas dimensões sem comprometimento da segurança da embalagem, é necessário conhecer-se detalhadamente as propriedades físicas e mecânicas da espuma. As informações sobre as espumas poliméricas tradicionais, obtidas do petróleo, já se encontram na literatura e em catálogos e manuais dos principais fornecedores; porém não se tem notícia de um estudo similar feito para as espumas da mamona. Este trabalho apresenta os dados levantados até o momento no escopo de desenvolvimento de uma embalagem Tipo B para transporte de materiais radioativos, no qual amostras de espumas foram submetidas aos ensaios de compressão uniaxial estática e a ensaios hidrostáticos. Os resultados obtidos revelam que a espuma de mamona apresenta comportamento mecânico similar ao das espumas tradicionais, com boa homogeneidade e reprodutibilidade das propriedades.

I. INTRODUÇÃO

O uso de amortecedores de impacto em embalagens para transporte e armazenamento de materiais radioativos já é bastante difundido. O interesse dos projetistas da área em prover suas embalagens com elementos de grande capacidade de absorção de energia se deve à exigência da norma de transporte da Agência Internacional de Energia Atômica [1], bem como a normas nacionais de vários países, entre eles o Brasil [2], de que embalagens para transporte de materiais radioativos sem limite do conteúdo radioativo (embalagens Tipo B) devam ser capazes de resistir a um acidente postulado consistindo de uma queda livre da altura de 9 metros sobre uma superfície rígida, na posição considerada mais vulnerável. A embalagem será considerada qualificada no teste de queda livre se não

houver dispersão do material acondicionado nem aumento significativo – mais de 20% – do nível de radiação na superfície da embalagem.

Alguns exemplos de embalagens com amortecedores de impacto são: a embalagem TRUPACT, para o transporte de rejeitos transurânicos nos EUA (Figura 1), a embalagem da firma alemã GNS, para rejeitos de alto nível vitrificados provenientes de instalações de reprocessamento (Figura 2) e a embalagem para elementos combustíveis esféricos irradiados, da firma alemã TRANSNUKLEAR (Figura 3).

Vários materiais com boa capacidade volumétrica de absorção de energia são utilizados como enchimento de amortecedores, como madeira (principalmente balsa e sequóia), espumas poliméricas e metálicas, concreto expandido e estruturas metálicas vazadas (colmeias e arranjos tubulares).

No estudo descrito neste trabalho, que visa o desenvolvimento de uma embalagem Tipo B baseada em tambor metálico de 200 litros e provida de amortecedor de impacto, a espuma de poliuretano rígida confeccionada a partir do polímero extraído do óleo de mamona (*Ricinus communis*) foi o material escolhido, devido à sua boa tenacidade (capacidade volumétrica de absorção de energia), trabalhabilidade, baixo custo e disponibilidade no mercado local [3].

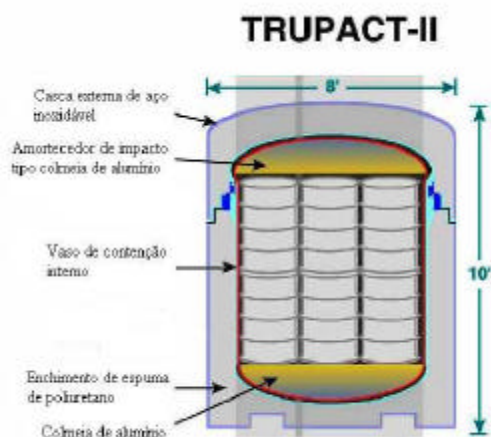


Figura 1. Embalagem TRUPACT.



Figura 2. Embalagem GNS após teste de queda-livre de 9m (os amortecedores são os componentes de cor amarela).



Figura 3. Embalagem TRANSNUCLEAR após teste de queda livre.

Para otimização da utilização do material polimérico e aproveitamento máximo do espaço disponível (do veículo de transporte ou da instalação de armazenamento), é necessário conhecer-se bem as propriedades deste material. Diversos estudos foram realizados para caracterização das espumas tradicionais (que utilizam o polímero obtido do petróleo), tanto no que se refere às suas características mecânicas quanto térmicas [4]-[9]. Contudo, não se tem notícia de um programa sistemático para caracterização da espuma obtida do óleo da mamona.

Este trabalho apresenta os resultados parciais dos ensaios realizados pelos autores. Foram realizados até o momento os ensaios de compressão estática uniaxial e compressão hidrostática. Na etapa seguinte, serão feitos os ensaios de impacto e ensaios hidrostáticos com taxa de compressão controlada.

II. ENSAIOS REALIZADOS

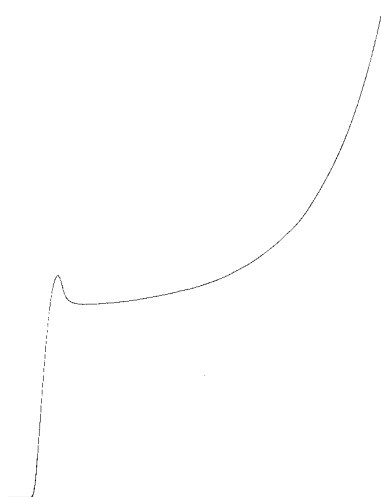
Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados em máquina de tração/compressão universal INSTRON, no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, segundo os critérios da norma ASTM-D-1621, *Compressive strength of rigid cellular plastics* [10]. Foram testados corpos de prova de seis densidades diferentes (41, 60, 87, 147, 253 e 361 kg/m³), segundo três taxas de deformação ($\dot{\epsilon} = 1,4 \times 10^{-3}$, $5,6 \times 10^{-3}$ e $1,4 \times 10^{-2}$ s⁻¹). Para avaliar o grau de anisotropia do material, os ensaios foram realizados nas direções paralela e perpendicular ao sentido de crescimento da espuma.

Os ensaios hidrostáticos foram feitos em uma câmara de pressão provida de êmbolo e anel de vedação, sendo o êmbolo diretamente acionado pelo pistão da INSTRON. Devido à limitação da máquina de ensaios, não foi possível testar-se a espuma de densidade 361 kg/m³. Antes dos ensaios, os corpos de prova foram envoltos em bolsas de látex, para evitar seu encharcamento pela água.

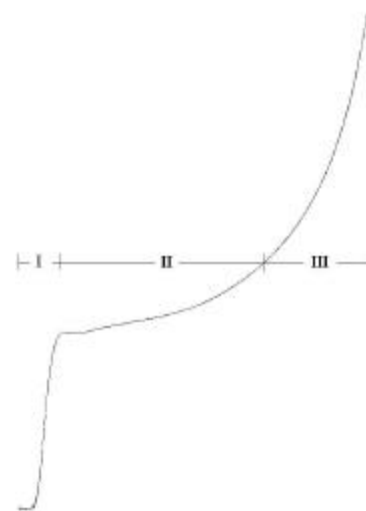
Foram usadas três taxas de deformação volumétrica: 0,024; 0,052 e 0,140 s⁻¹, sendo esta deformação definida como $e_v = \ln (V/V_0)$.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As curvas obtidas no ensaio de compressão uniaxial descrevem um comportamento típico das espumas de poliuretano rígidas (Figura 4a e 4b). Três regiões bem distintas podem ser observadas nesses gráficos. Na região inicial I, o material apresenta comportamento elástico, onde a tensão varia linearmente com a deformação. Segue-se um platô de plastificação (região II), onde, devido ao colapso sucessivo das células, ocorre uma grande deformação do corpo com pouco incremento da tensão aplicada. A inclinação média da curva nesta região fornece o módulo de encruamento plástico (ou tangencial), E_p . A região III se caracteriza por um súbito aumento da tensão sem aumento significativo de deformação. Este comportamento se deve ao adensamento da espuma causado pela compactação completa das células. Note-se que há um ponto de transição bem delimitado entre as regiões I e II, o que não se verifica entre as regiões II e III. É necessário portanto definir-se um critério para determinação deste. Adotou-se neste trabalho que esta transição se dá quando o valor da tensão sofre um acréscimo de 50% com relação a valor no início da região II (o valor da tensão na região de transição III é denominado tensão de platô - σ_p).



(a) Direção paralela



(b) Direção perpendicular

Figura 4. Curvas *tensão-deformação* obtidas no ensaio de compressão uniaxial

Um fenômeno observado em alguns casos de compressão na direção paralela foi o surgimento de um pico de tensão na transição das regiões I e II (Figura 4-a). Este pico se deve a que o colapso inicial das células se dá por flambagem de suas arestas, com a súbita queda da resistência do material. Como as células são alongadas na direção do crescimento da espuma, este efeito é mais pronunciado quando o esforço é exercido nesta direção. Contudo, este fenômeno foi observado somente no caso das espumas com densidade intermediária (60 e 87 kg/m³).

O estudo da variação das principais propriedades materiais com a densidade revelou um comportamento da espuma estudada bastante semelhante ao de espumas da indústria petroquímica. Para comparação, foram usados resultados obtidos pela firma americana General Plastics, fabricante da espuma *Last-a-foam* [8] e pelo Sandia National Laboratories, dos EUA, que desenvolveu a espuma CRETE [9].

Os resultados dos ensaios de compressão uniaxial estão mostrados nas Figuras 5 a 9. Observou-se que o módulo de elasticidade, que determina o comportamento elástico do material, varia linearmente com a densidade, enquanto a tenacidade e a tensão de platô variam quadraticamente, ainda que a influência do termo quadrático seja fraca (Figuras 5 a 7). As equações das curvas que melhor descrevem este comportamento são apresentadas nas figuras, destacando-se que elas não têm sentido físico quando a densidade da espuma se aproxima de zero. Estas equações são empregadas quando se utilizam métodos simplificados para síntese inicial das propriedades de espumas candidatas.

Outro parâmetro estudado foi o coeficiente de Poisson (ν), através da medição com paquímetro das dimensões laterais das amostras indeformadas e logo após os ensaios. Observou-se que as espumas de baixa e média densidades (tipicamente até $\rho = 147 \text{ kg/m}^3$) apresentaram ν

médio igual a 0,07, enquanto para as de alta densidade (253 e 326 kg/m³) este valor foi de 0,13. O coeficiente de Poisson tem grande influência em aplicações onde a espuma sofre confinamento lateral, como normalmente ocorre nos amortecedores de impacto, onde a alma de espuma é envolta por uma casca metálica.

Foi estudada também a contribuição das parcelas elástica (ϵ_{el}) e plástica (ϵ_{pl}) na deformação total (ϵ_t). O processo utilizado foi a determinação da deformação volumétrica imediatamente depois do ensaio e após uma semana. Como esperado, as amostras de menor densidade, mais flexíveis, apresentaram menor parcela de deformação plástica. A relação (ϵ_{pl}/ϵ_t) variou de 0,36 para a espuma de menor densidade a 0,46 para a de maior densidade, sendo que a espuma de 253 kg/m³ atingiu o valor máximo de 0,52.

Outra característica investigada foi o grau de anisotropia apresentado pela espuma obtida do óleo da mamona. Para isto, as amostras foram testadas nas direções paralela e perpendicular ao sentido de crescimento da espuma. Na Figura 8 são mostradas as curvas E - ρ em ambas direções, podendo-se notar que as espumas menos densas são mais rígidas quando comprimidas na direção paralela. Esta tendência se inverte para as espumas de maior densidade, que apresentam maior rigidez na direção perpendicular. As espumas com densidade intermediária, entre 200 e 300 kg/m³, podem, na prática, ser consideradas isotrópicas.

Estudo semelhante foi feito para as demais propriedades de interesse. Na Figura 9 são apresentados os resultados para a tenacidade. Observa-se que até a densidade aproximada de 250 kg/m³ a anisotropia do material se manifesta claramente, sendo que a espuma tem maior capacidade de absorção de energia quando comprimida na direção de seu crescimento. A partir desta densidade, a diferença praticamente desaparece e o material pode ser considerado isotrópico com relação a este parâmetro. Comportamento semelhante foi observado com relação à tensão de platô.

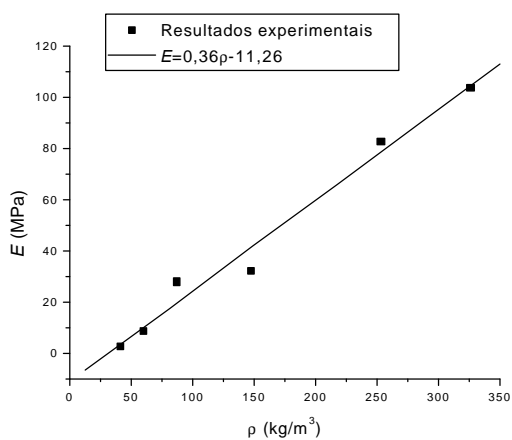


Figura 5. Variação do módulo de elasticidade com a densidade da espuma (não válido para $\rho \rightarrow 0$)

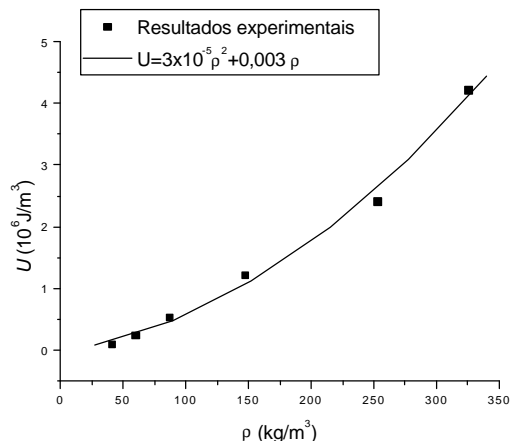


Figura 6. Variação da tenacidade com a densidade da espuma (não válido para $\rho \rightarrow 0$)

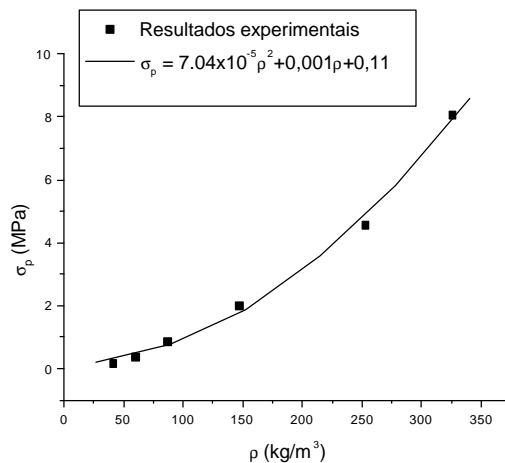


Figura 7. Variação da tensão de platô com a densidade (não válido para $\rho \rightarrow 0$)

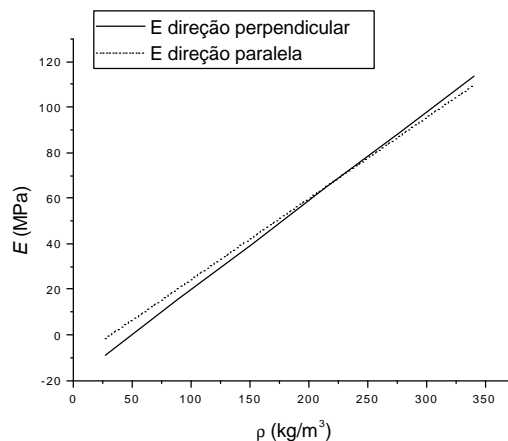


Figura 8. Anisotropia da espuma de poliuretano: variação do módulo de elasticidade com a direção

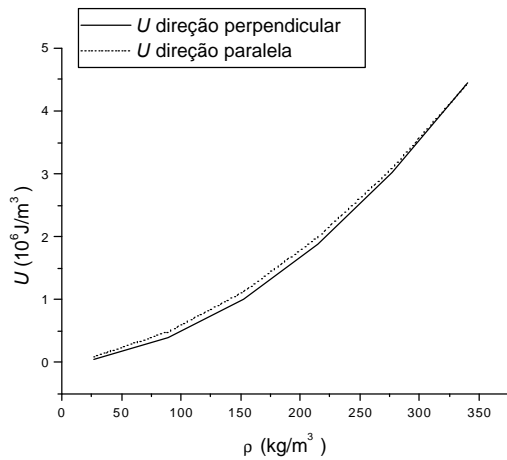


Figura 9. Variação da tenacidade

Os resultados dos ensaios hidrostáticos estão mostrados na Figura 10. Devido às limitações do circuito de teste usado, não foi possível testar-se espumas com densidade superior a 143 kg/m³. A deformação volumétrica (ϵ_v) é computada como $\epsilon_v = \ln(V/V_0)$, onde V é o volume deformado e V_0 o volume inicial da amostra. Note-se que, com esta definição, ϵ_v pode assumir valores superiores à unidade.

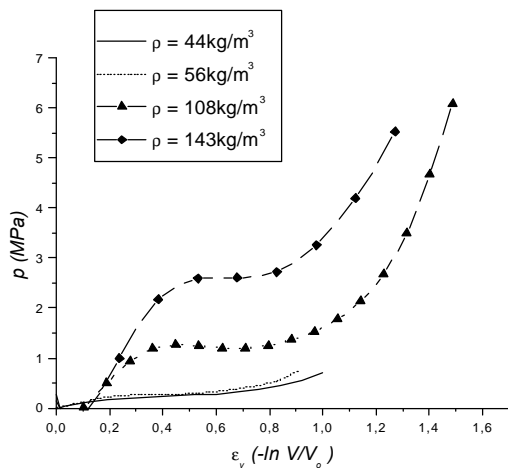


Figura 10. Ensaio de compressão hidrostática – resultados preliminares

Conforme esperado, as espumas de menor densidade são menos resistentes aos esforços tridimensionais. Pode-se observar que a espuma de menor densidade (41 kg/m³) apresenta grande platô de plastificação, com pouco encruamento tangencial. Inversamente, a espuma de maior densidade ($\rho = 143 \text{ kg/m}^3$) possui um platô curto e grande encruamento tangencial.

As curvas intermediárias não apresentam comportamento regular e compatível com os dados relatados na literatura. Uma possível causa desta perturbação pode estar relacionada com o método de teste empregado que, conforme explicado anteriormente, consistiu na compressão de cada amostra individualmente até determinada pressão e cômputo da deformação volumétrica correspondente.

IV. CONCLUSÕES

Foram apresentados neste trabalho os resultados dos ensaios mecânicos realizados em corpos de prova de espuma de poliuretano obtida a partir do óleo da mamona. Foram estudadas espumas de diversas densidades, submetidas aos ensaios de compressão uniaxial e hidrostática. A completa caracterização do material para a aplicação a que se destina – enchimento de amortecedor de impacto para embalagens – demanda ainda a realização de ensaios de impacto, previstos para próxima etapa.

As principais conclusões da etapa concluída são apresentadas a seguir.

Primeiramente, observou-se que a espuma produzida a partir do óleo da mamona tem comportamento à compressão uniaxial estática semelhante ao da espuma polimérica tradicional, obtida a partir do petróleo. A curva típica obtida apresenta as três regiões características (elástica inicial, platô de plastificação e adensamento) e os principais parâmetros físicos (módulo de elasticidade, tenacidade e tensão de platô) são semelhantes, em valores absolutos e quanto ao modo de variação destes parâmetros com a densidade, ao das espumas de poliuretano tradicionais. Além disso, a espuma do óleo de mamona também apresenta anisotropia com relação à direção do crescimento de suas células.

A existência desta semelhança é de grande importância, uma vez que se constitui uma condição *sine qua non* para o uso dos modelos constitutivos desenvolvidos para as espumas tradicionais, que estão implementados nos diversos códigos computacionais de elementos finitos comumente usados no projeto de amortecedores de impacto. [11-12]

A segunda conclusão tirada da campanha de testes uniaxiais é que, dentro da faixa de variação da taxa de deformação empregada ($\dot{\epsilon} = 1,4 \times 10^{-3}$, $5,6 \times 10^{-3}$ e $1,4 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$), não houve variação detectável na resposta do material. Contudo, é relatado na literatura que espumas poliméricas são mais rígidas quando comprimidas a maiores velocidades. Esta característica será comprovada na próxima etapa do estudo, quando se realizarão ensaios de compressão dinâmicos a diferentes taxas de compressão.

Quanto aos ensaios de compressão hidrostática, pôde-se constatar que a espuma obtida do óleo da mamona apresenta o comportamento característico das espumas tradicionais (curva com regiões I, II e III distintas). Também verificou-se, como esperado, que as espumas de maior densidade absorvem mais energia durante a deformação volumétrica.

REFERÊNCIAS

- [1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Regulations for the safe transport of radioactive materials**. ST-1. Viena, 1996.
- [2] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Transporte de materiais nucleares**. CNEN-NE-501. Rio de Janeiro, Julho 1988.
- [3] POLY-URETHANE. **Poly-urethane news letter**. Boletim Informativo, ano I, n. 01, agosto 1999.
- [4] MAJI, A.K. et al. **Mechanical properties of polyurethane foam impact limiter**. Journal of engineering mechanics, v. 121, p. 528-537, 1995.
- [5] WENSKI, E. G. et al. **Properties of 30 lb/ft³ rigid polyurethane foams**. Albuquerque: Sandia National Laboratories, March 1997. (SAND-97-0120).
- [6] MAJI, A.K. **Dynamic testing of impact limiter materials (polyurethane foams and aluminum honeycomb)**. SNL/WERC, Albuquerque, EUA.
- [7] DUFFEY, T. A. et al. **Characterization of impact-limiting material**. Albuquerque: Sandia National Laboratories, May 1992. (SAND-92-0773).
- [8] GENERAL PLASTICS MANUFACTURING CO. **General plastics Last-a-Foam Ô FR-3700 for crash & fire protection of nuclear material shipping containers**. Feb 1999 (re-printed).
- [9] GOODS, S. H. et al. **Mechanical properties and energy absorption characteristics of a polyurethane foam**. Albuquerque: Sandia National Laboratories, March 1997. (SAND-87-8490).
- [10] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, EUA. **1990 Annual book of ASTM standards**, v. 08.01, 15.03, 15.09, 1990.
- [11] HKS, INC. **Abaqus/Explicit user's manual**, version 5.8. Pawtucket, EUA, 1998.
- [12] ANSYS, INC. **Ansys user's manual**, version 5.3. Houston, EUA, 1996.

ABSTRACT

Impact limiters are sacrificial components widely used to protect radioactive waste packages against damages arising from falls, fires and collisions with protruding objects. Several materials have been used as impact limiter filling: wood, aluminum honeycomb, and metallic or polymeric foams. Besides, hollow structures are also used as shock absorbers, either as a single shell or as a tube array. One of the most popular materials among package designers is rigid polyurethane foam, owing to its toughness, workability, low specific weight, low costs and commercial availability. In Brazil, a foam developed using the polymer extracted from the castor oil plant (*Ricinus communis*) is being studied as a potential impact limiter filling. For a better performance of this material, it is necessary to minimize the impact limiter dimensions without compromising the package safety. For this, 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 foreign manufacturers' brochures, but no data has been published about the properties of the castor oil foam. This paper presents data gathered in an ongoing research program aiming at the development of a Type-B packaging. Foam samples were submitted to uniaxial static compression tests and to hydrostatic tests. 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.

[13]