

EFEITO DA RADIAÇÃO GAMA EM POLÍMEROS USADOS COMO IMOBILIZADORES DE RESINAS DE TROCA IÔNICA: PARTE I - PROPRIEDADES DO PEBD

Daniel Liu Chun Hung, Selma M.L. Guedes*, Humberto G. Riella

Ministério da Marinha
COPESP- Coordenadoria Para Projetos Especiais
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 Cidade Universitária
CEP 05508-900, Butantã, São Paulo- S.P.

* Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/CNEN
Caixa Postal 11049, CEP 05499-970, São Paulo, S.P.

RESUMO

Neste trabalho foram realizados ensaios para avaliar as propriedades tais como: a densidade, a dureza Shore D, a resistência à tração e o alongamento na ruptura do polietileno de baixa densidade (PEBD), o qual é utilizado como agente imobilizador da resina, em função da dose de irradiação e da concentração da resina de troca iônica incorporada. Foi observada também a variação de cor do PEBD, decorrente da interação entre o polímero e a radiação gama. Os resultados mostraram a ocorrência da formação do radical fenil proveniente do aditivo de base amina aromática, introduzido pelo fabricante, que é responsável pela variação da cor. A presença da cadeia aromática confere uma boa resistência radiolítica do PEBD até a dose estudada de 5 MGy. A concentração da resina provocou maior variação das propriedades do que o efeito da radiação. Foi possível incorporar até 60% em peso de resina, resultando em alta redução de volume final.

Descritores: Rejeitos Radioativos, Imobilização, Polímeros.

ABSTRACT

In this work tests were realized to evaluate properties such as: density, Shore D hardness, tensile strength and rupture elongation of low density polyethylene (LDPE), which is used as resin solidification agent, in function of irradiation dose and ion exchange resin concentration incorporated. It also was observed LDPE color change, due to interaction between polymer and gamma radiation. The results showed the occurrence of phenyl radical formation, deriving from amine aromatic additive, introduced by polymer producer, which is responsible by color change. Up to studied dose of 5 MGy, the aromatic chain presence gave to LDPE the good resistance to radiation. Resin concentration provoked more variation on properties than radiation effect. It was possible to incorporate up to 60%wt of resin, resulting high reduction of final volume.

Key words: Radioactive wastes, Immobilization, Polymers

Biblioteca

COLEÇÃO PTC
DEVOLVER AO BALÇAO DE EMPRÉSTIMO

INTRODUÇÃO

Dentre os diversos tipos de rejeitos gerados nas instalações nucleares destacam-se as resinas de troca iônica. A quantidade gerada desses rejeitos, assim como os dos outros, tem aumentado recentemente e, quando os rejeitos não são adequadamente gerenciados, muitas vezes podem conter quantidade suficiente de radionuclídeos para apresentar riscos à saúde humana. O gerenciamento adequado envolve várias etapas de processo, as quais iniciam a partir da fonte geradora até a sua disposição final. Os processos compreendem operações físicas e químicas, as quais requerem técnicas apropriadas para cada operação necessária. A Figura 1 mostra, em forma de diagrama de blocos, as principais etapas tradicionais do gerenciamento de rejeitos radioativos [1].

Entre as etapas que compõem o gerenciamento adequado de rejeitos radioativos está a etapa de acondicionamento dos rejeitos. Nesta etapa destaca-se o processo de imobilização, que é amplamente utilizado no mundo, principalmente para acondicionar as resinas de troca iônica exauridas, facilitando a sua manipulação e proporcionando transporte e guarda segura.

O objetivo de solidificar rejeitos radioativos em uma matriz sólida monolítica, é de reduzir a probabilidade de liberação de radionuclídeos para o meio ambiente, durante a estocagem intermediária, o transporte e a disposição final. Além desta característica, as propriedades físicas, químicas e radiológicas das estruturas imobilizadas devem apresentar estabilidade, de tal forma a garantir a integridade do produto durante o tempo necessário para o decaimento dos radionuclídeos contidos até níveis aceitáveis. Na incorporação de rejeitos em agente imobilizador, são

esperadas certas variações nas propriedades da mistura como um todo. O processo de imobilização de rejeito radioativo, na etapa de acondicionamento, é extremamente necessário para a segurança do meio ambiente. Entretanto, devido à diversidade de rejeitos radiativos gerados nas instalações nucleares, os agentes imobilizadores comumente utilizados nem sempre são compatíveis, fisicamente ou quimicamente, com os rejeitos, tornando-se necessária a pesquisa e o desenvolvimento que visam melhorar a qualidade das matrizes de imobilização.

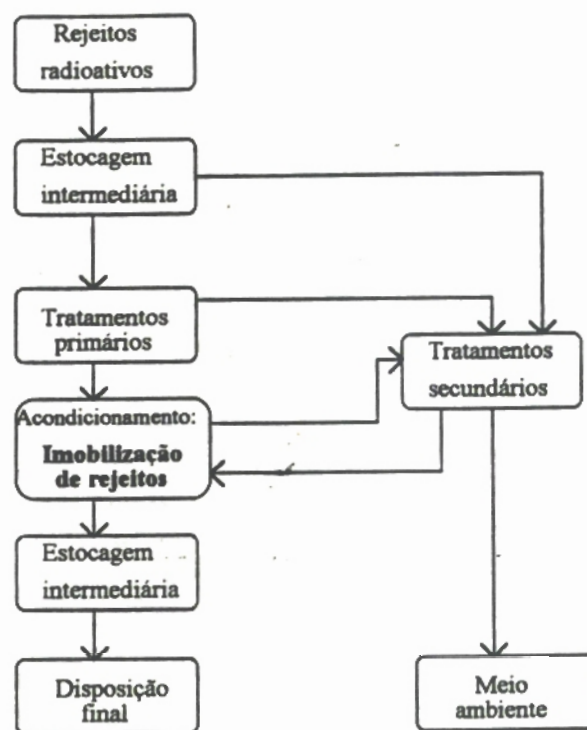


Figura 1: Etapas de gerenciamento de rejeitos radioativos

Dependendo do tipo de agente imobilizador utilizado, os rejeitos a serem imobilizados devem ser submetidos a certos tratamentos, tais como remoção do excesso de água existente nos rejeitos e/ou

ajuste químico, etc., antes de serem incorporados no agente imobilizador, visando compatibilização física e quimicamente.

Diversos materiais, tais como: cimento, polímero, betume, vidro, etc., podem ser utilizados para solidificar os rejeitos radioativos. Cada material apresenta suas vantagens e desvantagens na solidificação de diferentes tipos de rejeitos, conseqüentemente, propriedades diferentes são encontradas nas formas imobilizadas obtidas. Atualmente o cimento é amplamente utilizado no processo de imobilização, devido ao baixo custo da matéria prima, comparado com outros materiais acima mencionados. A técnica utilizada é baseada na engenharia civil, onde as propriedades do cimento são bem conhecidas. Entretanto, o cimento é altamente poroso e somente baixa fração do rejeito pode ser incorporado[2]. Estes fatores fazem com que as novas pesquisas sejam voltadas para desenvolvimento de novos agentes imobilizadores, com o propósito de substituir o cimento.

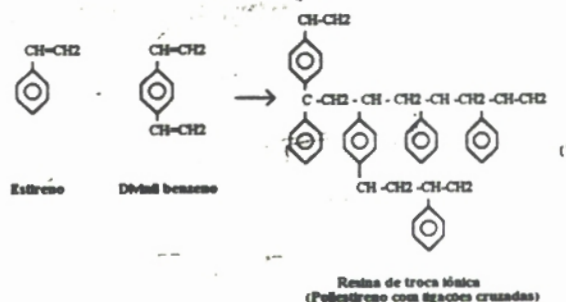
Os polímeros apresentam propriedades inerentes, tais como: baixa permeabilidade à água, facilidade de conformação, baixo peso em relação ao cimento, altamente inertes quimicamente com diversos tipos de rejeitos, etc. Estes fatores contribuem para aumentar o interesse destes materiais como agentes imobilizadores.

As resinas de troca iônica são amplamente utilizadas no sistema de purificação da água utilizada nas instalações nucleares, principalmente a água de resfriamento do reator, onde são facilmente contaminadas por radionuclídeos existentes na água, provenientes dos produtos de corrosão do material estrutural do núcleo do reator e, às vezes, de algumas varetas danificadas do núcleo

do reator, ou eventuais produtos de ativação dos aditivos introduzidos na água.

A maioria das resinas, encontradas comercialmente, são resinas orgânicas sintéticas[3]. São formadas por uma cadeia de hidrocarbonetos, geralmente poliestireno linear, reticulado com o divinilbenzeno(DVB), como mostra Equação(1). As ligações cruzadas são responsáveis pelas propriedades mecânicas e pela dureza da resina de troca iônica. A capacidade de troca é determinada através dos grupos funcionais que são introduzidos na resina.

Quando as resinas são saturadas, elas não são posteriormente regeneradas, pois o processo para isto é caro, envolvendo diversos solventes que resultariam na formação de rejeitos líquidos contaminados, os quais requerem outros processos apropriados para tratá-los.



Equação 1: Reação de formação da resina de troca iônica.

Neste trabalho é proposto o agente imobilizador Polietileno de baixa densidade (PEBD), facilmente encontrado no mercado, para imobilizar resinas de troca iônica. Por causa da impossibilidade de manipular materiais radioativos na confecção de corpos de prova para os ensaios, as resinas utilizadas foram "frias", ou seja, não contaminadas com material radioativo. Após a incorporação, a mistura

foi exposta à radiação gama proveniente de uma fonte de ^{60}Co .

MATERIAIS E MÉTODOS

O polímero utilizado foi PEBD do tipo PE G803 da Politeo S.A., cuja massa específica é $0,919\text{g/cm}^3$ e o índice de fluidez é igual a 30 g/10min. [4]. As resinas de troca iônica utilizadas foram a catiônica IR-120 e a aniônica IRA-420, ambas do tipo Amberlite "gel" da Rhom & Haas S.A., e em forma de esferas com diâmetro variando entre 0,1 e 1,0 mm. A composição química básica é estireno-divinil benzeno e suas massas específicas são $1,26$ e $1,12\text{g/cm}^3$, respectivamente. [5]

As resinas de troca iônica foram colocadas em uma estufa a 100°C , por um período de aproximadamente 24 horas, com o objetivo de reduzir a umidade existente. O teor de umidade inicial das resinas de troca iônica era de aproximadamente 50% em peso, o qual é necessário para conservá-las. Após a remoção da água, as resinas catiônicas e aniônicas foram misturadas homogeneamente, na proporção de 40 e 60% (em peso), respectivamente, formando uma resina mista, que foi utilizada em todas as amostras deste trabalho. Através da análise termogravimétrica, a resina mista após a secagem ainda apresentava, aproximadamente 4% em peso de umidade. As resinas de troca iônica são ligeiramente higroscópicas [6].

Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos. A confecção dos corpos de prova foi realizada na empresa Cromex S.A. Uma quantidade pré-determinada de PEBD foi colocado em um misturador "Drays" com capacidade de 500ml. A mistura foi realizada sob agitação a alta rotação, durante a qual o polímero foi fundido pelo calor de atrito. O controle foi feito por meio de um

amperímetro acoplado ao motor de agitação, ou seja, quando a amostra dentro do misturador funde, há uma redução de potência exigida do motor para agitação. Após a fusão do polímero foi adicionada uma proporção pré definida de resina mista, e prosseguiu-se por alguns segundos a agitação para garantir a homogeneidade da mistura.

A mistura foi retirada, em forma de pasta, e colocada em uma prensa aquecida a fim de reduzir a sua dimensão física, para que fosse triturada até a forma que permita ser alimentada numa máquina extrusora de rosca simples. Ao longo da rosca a amostra foi aquecida gradualmente, da temperatura ambiente até aproximadamente 140°C . A mistura saiu na forma de fios que foram tracionados e cortados na forma de grânulos. Os grânulos foram introduzidos numa máquina injetora e aquecidos, gradualmente, até aproximadamente 140°C . O material foi injetado em moldes conectados na saída, os quais são adequados para a obtenção de corpos de prova utilizados em ensaios mecânicos. A temperatura do aquecimento da mistura não deve ser superior a 140°C , pois a resina aniônica, entre 160 e 180°C , gera gás amônia e a resina catiônica libera o gás SO_2 [7]. As proporções, % em peso, da resina mista incorporada foram: 0; 20; 40; 50 e 60% (incluído os 4% de umidade existente).

Os corpos de prova foram expostos à radiação gama provenientes de uma fonte de cobalto-60 do IPEN, tipo "panorâmica", na presença de ar, numa distância de 10 cm da fonte, com uma taxa de dose de $1,27\text{ kGy/hora}$. As doses foram: 0; 0,01; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0 e 5,0 MGy. A dose de 5 MGy foi obtida na empresa EMBRARAD S.A., cuja taxa de dose da fonte de cobalto-60 foi aproximadamente 60 kGy/hora .

Foi efetuada a incorporação de resinas úmidas no PEBD; no entanto, durante as operações de fusão do polímero, principalmente na máquina injetora, ocorreu a evaporação acentuada de água, provocando a formação de bolhas de ar no interior dos corpos de prova.

Os corpos de prova irradiados e não irradiados, com e sem resinas de troca iônica, foram submetidos a ensaios para se obter valores de suas propriedades. No ensaio de tração utilizaram-se os procedimentos descritos na norma ASTM 638; o equipamento utilizado foi o Instron, modelo 4206, tipo Universal. A velocidade do ensaio foi de 5 mm/min.

A dureza Shore D (ASTM 2240) das amostras foi obtida por meio de um durômetro Woltest, modelo SD300. As amostras utilizadas apresentaram superfícies planas e paralelas, o que é requerido para este ensaio.

A densidade das amostras foram determinadas por meio de um picnômetro de hélio, AccuPye 1330 da marca Micromeritic. As amostras foram fraturadas em pedaços pequenos, cujas massas utilizadas nos ensaios variaram entre 1,5 e 3,0 g.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O comportamento do PEBD foi estudado em função da dose de irradiação, que variou entre 0 e 5 MGy, e da concentração de resina incorporada até 60% em peso. Os aspectos estudados foram: coloração, densidade, dureza Shore D, resistência à tração e alongamento na ruptura.

Coloração. Os corpos de prova foram expostos à radiação gama, na presença de ar e para a maioria dos polímeros ocorre, simultaneamente, a oxidação pelo oxigênio do ar e as reações radiolíticas, provocando várias alterações

nas propriedades do material, entre elas a mudança de cor. A mudança de cor pode ocorrer como consequência da formação de novos grupos funcionais ou de radicais que absorvem na região visível. A Figura 2 mostra a seqüência de amostras de PEBD, sem resina, com diferentes doses de irradiação. É observado que para dose de 0,5 MGy (PEA50) o material já apresenta a mudança de coloração e isto é mais evidente para dose de 5 MGy (PEA500), ou seja, o material torna-se totalmente amarelado. Esta variação da cor indica possível formação de insaturações, tais como grupos vinílicos. Também pode ocorrer formação do grupo fenil, proveniente da amina aromática e identificada através do espectro de absorção na região infravermelho [1], que é o aditivo, introduzido pelo fabricante, o qual absorve na região do visível, e possivelmente é responsável pelo surgimento da cor amarela. O grau de amarelamento é proporcional à dose de radiação [8].

Densidade. Esta propriedade é muito importante quando relacionada aos aspectos de disposição final de rejeitos radioativos, visto que em certos países é utilizada a deposição de rejeito no fundo do mar. Esta atitude contraria as recomendações da Agência Internacional sobre o assunto. Desta forma, a densidade do produto imobilizado é um fator que deve ser bem conhecido.

As informações sobre as modificações da estrutura induzidas pela radiação também podem ser obtidas por meio das medidas de densidade [9].

A densidade de um material reflete a sua estrutura química e a sua organização molecular. Assim, as regiões cristalinas são mais compactas, enquanto que as regiões amorfas são mais volumosas. Quando predomina a reticulação na radiólise do polímero, é

esperada uma diminuição da cristalinidade e, conseqüentemente, a densidade deve diminuir. Quando predomina a cisão da cadeia polimérica é esperado um aumento da cristalinidade.



Figura 2: Efeito da dose na coloração do PEBD. PEA-00 = 0 MGy; PEA-50 = 0,5 MGy; PEA-100 = 1,0 MGy e PEA-500 = 5,0 MGy.

O efeito da concentração, percentagem em peso, da resina incorporada no polietileno é mostrado na Tabela 1. A incorporação de até 60% em peso da resina no polietileno aumentou a densidade em aproximadamente 31%.

A Tabela 2 mostra o efeito da dose na densidade do PEBD na ausência de resina. Com o aumento da dose até 5MGy, a densidade decresceu 0,3%, indicando a predominância da reticulação.

A Tabela 3 mostra o efeito da dose na densidade da mistura de PEBD com 60% em peso de resina. Quando a mistura não foi irradiada a incorporação de resina aumentou a densidade do PEBD em 31%. Quando foi irradiada com doses entre 0,5 e 5,0 MGy o aumento da densidade foi menor, de 20 para 22%.

De uma maneira geral a densidade dos polímeros não foi afetada significativamente pelas doses de irradiação, como Jenkins [10] previu em seu trabalho.

Tabela 1: Efeito da concentração da resina na densidade do PEBD.

[RESINA] (% peso)	DENSIDADE (g/cm ³)
0	0,918
20	0,963
40	1,023
50	1,125
60	1,203

Tabela 2: Efeito da dose na densidade do PEBD.

Dose(MGy)	Densidade (g/cm ³)
0	0,918
0,5	0,916
1	0,916
5	0,915

Dose até 0,5 MGy promove, principalmente, a reticulação da cadeia polimérica da resina. O efeito da radiação na densidade da mistura é mais acentuado na resina do que no PEBD. Dose de 5 MGy reduz a densidade do PEBD em apenas 0,3%, enquanto que reduz a densidade da mistura que contém 60% em peso de resina em 8%.

Tabela 3: Efeito da dose e da concentração da resina na densidade (g/cm³) do PEBD.

DOSE (MGy)	[Resina] (%peso)		VD*
	0	60	
0	0,918	1,203	31%
0,5	0,916	1,100	20%
1	0,916	1,112	21%
5	0,915	1,112	22
VD*	-0,3%	-8%	-

* variação da densidade

Propriedades mecânicas. As propriedades da matriz imobilizada devem

atender as exigências da filosofia adotada para o sistema de disposição de rejeitos radioativos. A variação de condições externas, tais como: temperatura, pressão, etc. durante as fases de estocagem intermediária, transporte e disposição final, afeta as propriedades da matriz imobilizada, as quais comprometem diretamente a segurança em relação ao meio ambiente. Certas propriedades devem ser estudadas, principalmente, a resistência durante as fases mencionadas, a fim de assegurar a integridade da matriz imobilizada.

As propriedades mecânicas estudadas foram a dureza Shore D, a resistência à tração e o alongamento na ruptura, quando as misturas do polímero, com a resina de troca iônica, foram expostas à radiação.

Dureza Shore D. A dureza mede a resistência à penetração, ou ao risco. Esta propriedade é muito importante para a matriz quando é exposta a meios erosivos. O polímero estudado, sem resina e não irradiado, apresenta a seguinte dureza Shore D: 45,7 unidades.

De uma maneira geral, os valores obtidos mostram que a dureza Shore D do polímero estudado foi mais afetada pela variação da concentração da resina que pela variação das doses de irradiação aplicadas.

A Figura 3 mostra o efeito da dose e da concentração da resina na radiólise do PEBD. Nela é observado que até 20% e 60% em peso da resina incorporada ao PEBD, a dureza da mistura atingiu um valor máximo com 0,2 MGy. Para concentrações entre 40 e 50% em peso de resina, a dureza máxima é atingida com 0,1 MGy. A partir destas doses a dureza decresceu ligeiramente com o aumento da dose, exceto com 20% em peso da resina.

Esse aumento da dureza com doses de até 0,2 MGy confirma a ocorrência da

reação de reticulação. Segundo Rosa [11], na faixa de doses entre 0,025 e 0,10 MGy, ocorre essencialmente o processo de reticulação no PEBD. Além desse efeito, o poliestireno, que forma a estrutura básica da resina incorporada, apresenta processo de reticulação até aproximadamente 0,5 MGy [12].

O aumento da dureza, à medida que se aumentou a concentração da resina, pode ser explicado pela presença do poliestireno, cuja temperatura de transição vítrea (≈ 100 °C) [13] é muito superior à do PEBD (≈ 30 °C). Portanto, o poliestireno, na temperatura ambiente, é extremamente mais rígido que o PEBD.

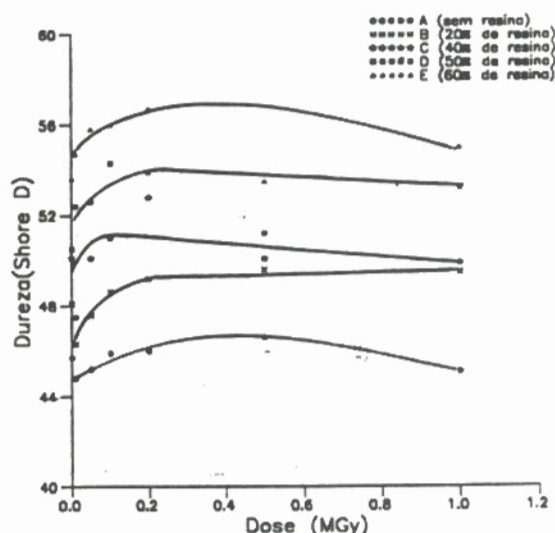


Figura 3: Efeito da dose e da concentração da resina na dureza Shore D do PEBD.

Resistência à Tração. Esta propriedade é avaliada em função da carga aplicada ao material por unidade de área, no momento da ruptura. A Figura 4 mostra os valores obtidos da resistência à tração (RT) para o PEBD. Quando foi incorporado 50% em peso de resina de troca iônica e não irradiado, a RT decresceu aproximadamente 66%.

Entretanto, quando se irradiou a mistura com dose de até 1 MGy, o decréscimo da resistência à tração foi de 46%. Estes valores mostraram que 1MGy promoveu o aumento da RT na mistura do PEBD, como consequência da predominância da reticulação mas, a cisão predominou a partir desta dose. À medida que a concentração da resina aumenta, a RT decresce. Entretanto, quando PEBD foi irradiado com doses até 1MGy observou-se que a presença da resina provocou maior reticulação, porque aumentou o intervalo de dose onde ocorreu o aumento da RT.

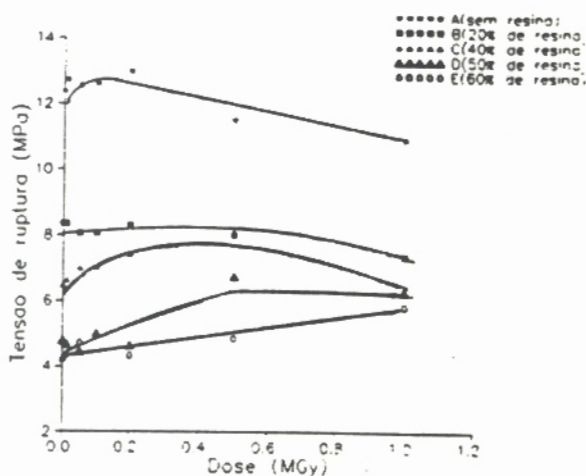


Figura 4: Efeito da dose e da concentração de resina de troca iônica na resistência à tração do PEBD.

É interessante observar que, embora a presença de 60% de resina no PEBD promovesse a reticulação quando a mistura foi irradiada com 1 MGy, porque a RT variou de 4,2 MPa a 5,9 MPa, não foi suficiente para anular o efeito físico da mistura da resina no PEBD, em razão de ambos os materiais apresentarem estruturas químicas bem diferentes. A presença de 60% de resina no PEBD reduziu a RT em 180% enquanto o efeito

de 1 MGy aumentou a RT em 40%. Este fato pode ser explicado porque a presença da resina afetou a cinética de cristalização e a morfologia do PEBD [9], principalmente porque os componentes são imiscíveis. Por outro lado, a dose de 5 MGy reduziu a RT abaixo do valor da mistura não irradiada.

Alongamento na Ruptura. No PEBD, à medida que se aumentou a concentração da resina, os valores de alongamento diminuíram. As amostras contendo entre 0 e 40% em peso de resina mostraram que a partir de aproximadamente 0,2 MGy, a queda do alongamento foi mais acentuada, como mostra a Figura 5. As amostras contendo 50 e 60% em peso de resina, cuja estrutura básica é DVB, não apresentaram variação significativa no alongamento. Sabe-se que a temperatura de transição vítrea do DVB é de aproximadamente 85 °C, e na temperatura ambiente é mais rígido do que PEBD, cuja temperatura de transição vítrea é aproximadamente -30 °C.

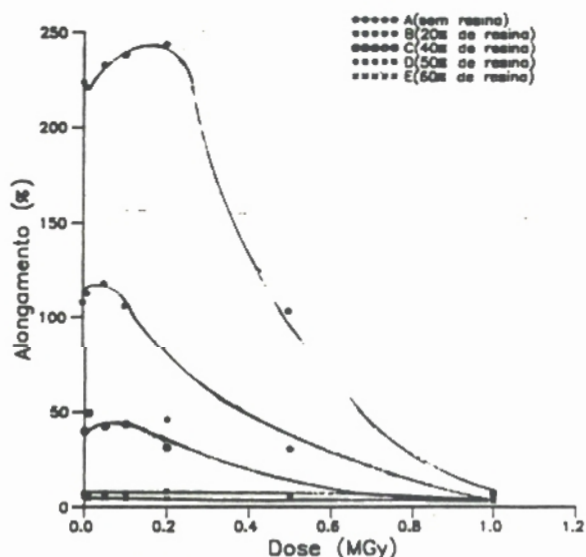


Figura 5: Efeito da dose e da concentração da resina no alongamento do PEBD.

Na ausência da resina, o alongamento na ruptura do PEBD é de aproximadamente 224%. O alongamento diminuiu para cerca de 5% com a incorporação de 60% em peso de resina. O baixo alongamento está relacionado a má transferência das forças entre as fases da mistura imiscível, onde as forças de adesão na interface são muito fracas nestas misturas, causando falha prematura sob tensão [13].

Em concentrações até 40% de resina, doses menores que 0,2 MGy aumentam o alongamento enquanto que, doses maiores diminuem acentuadamente o alongamento, chegando a só 3% para dose de 1 MGy, como consequência da reticulação. Em concentrações entre 50 e 60% de resina, cuja constituição química básica é o DVB, não ocorrem variações significativas do alongamento em doses até 1 MGy.

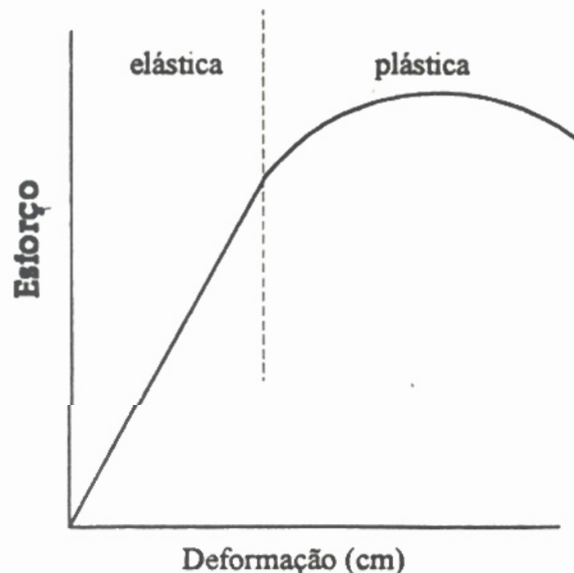


Figura 6: Gráfico típico do esforço versus deformação de um material dúctil.

As amostras com 20 e 40% em peso de resina apresentaram, em doses menores que 0,5 MGy, a predominância da

deformação plástica (Figura 6), a qual diminui à medida que aumenta a dose de irradiação, atingindo até valores de alongamento das amostras com maiores concentrações de resina.

As amostras com 50 e 60% em peso de resina apresentaram, praticamente, apenas a deformação elástica, cujos valores de alongamento são extremamente pequenos em relação ao alongamento decorrente da deformação plástica, as quais praticamente não variaram no intervalo de dose estudado.

CONCLUSÕES

O PEBD mostrou ser resistente radioliticamente até a dose trabalhada de 5 MGy pois, embora nos ensaios realizados as propriedades têm diminuído em doses maiores, esta queda não foi acentuada, principalmente nas amostras sem resina de troca iônica. O amarelamento do produto após a irradiação foi causado pelo aditivo introduzido na fabricação. Até a dose de aproximadamente 0,2 MGy, o processo de reticulação predominou, o que aumentou a resistência à tração e a dureza. No entanto, a partir desta dose as propriedades diminuíram, indicando a predominância da cisão. A cristalinidade foi também afetada pela radiação, refletindo diretamente na densidade do material.

Foi observado que a concentração da resina de troca iônica provocou maior variação das propriedades do PEBD do que o efeito da radiação. Foi possível incorporar até 60% em peso de resina, resultando elevada redução de volume final.

AGRADECIMENTO

Os autores gostariam de agradecer às empresas Cromex S.A. e Rhom & Haas

S.A pelo fornecimento de matéria prima e disposição de seus equipamentos para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] Liu, C.H. *Imobilização de Resinas de Troca Iônica em Polímeros*. São Paulo, 1994. (Tese de Mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares).
- [2] RZYSKI, M.B.; MARUMO, T. J.; SUAREZ, A. A. *Imobilização de Rejeitos Radioativos de Reatores de Potência em Cimento*. In: American Nuclear Society. Nuclear Energy and the Environment: LAS/ANS Symposium of... held in Rio de Janeiro, 28 June - 01 July, 1993, p. PIV1-9
- [3] NEILSON Jr., R. M.; COLOMBO, P.; FUHRMANN, M.; ARNOLD, G.; FRANZ, E. M.; DOTY, R.; KALB, P.; KEMENY, P.; REILLY, S. *Solidification of Ion-Exchange Resin Wastes*. Upton, N.Y., Brookhaven National Laboratory, 1982. (BNL-51615).
- [4] POLITENO S.A., Boletim técnico.
- [5] RHOM&HAAS S.A., Boletim técnico.
- [6] MCGINNISS, V. D. Cross-linking with Radiation. In: Encyclopedia of Polymer Science and Engineering. 2 ed., New York, N.Y., 1985, vol. 4, p. 422.
- [7] MORIYAMA, N.; DORIJO, S.; EMURA, S. Incorporation of Radioactive Spent Ion-Exchange Resins in Plastics. *J. Nucl. Sci Technol.* 12(6), 1975, p.362-9.
- [8] ARAÚJO, E. S. *Degradação e Estabilidade Radiolítica do Policarbonato*. São Paulo, 1993. (Tese de Doutorado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares).
- [9] RIZZO, G.; SPADARO, G.; ACIERNO, D. Physico-chemical Properties of Irradiated LDPE-iPP Blends. *Radiat. Phys. Chem.*, 21(4): 349-53, 1983.
- [10] JENKINS H. & KELLER A. Radiation-Induced Changes in Physical Properties of Bulk Polyethylene.I. Effect of Crystallization Conditions, *J. Macrom. Sci. Phys.*, B11(3), 301-23, 1975.
- [11] ROSA, D.S., GALEMBECK, F., *Modificação de Polietileno de Baixa Densidade(PEBD), Polipropileno isostático(iPP) e suas Misturas, por Radiação Gama*. In: Associação Brasileira de Polímeros. Polímeros: Anais do I Congresso Brasileiro de realizado em São Paulo, 05-07 nov., 1991, vol.1, p. 364-9.
- [12] LIU, C. H. *Estágio no Laboratório de Polímeros*. Relatório Técnico Interno, COPESP, São Paulo. (RP110611S003474-01, jun./92)
- [13] MANO, E. B. *Polímeros como Materiais de Engenharia*, São Paulo Edgard Blucher, 1991.