

INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE EMPREGO NA TENACIDADE À FRATURA DO POLICARBONATO ¹

Ricardo Pondé Weber ²

Mariana Rocha Mendonça da Silva ³

João Carlos Miguez Suarez ⁴

Resumo

Os materiais poliméricos, quando expostos à agentes ambientais agressivos, apresentam degradação por processos físicos e/ou químicos. O crescimento do emprego destes materiais sob condições de carregamento tem levado, face ao seu comportamento não linear dependente do tempo, ao desenvolvimento de novos métodos no campo da mecânica da fratura. Estes métodos visam agregar o comportamento viscoelástico e viscoplástico apresentado pelos polímeros ao estudo do desempenho mecânico desses materiais. Dentre os modelos mais recentes pode-se destacar o método do Trabalho Essencial de Fratura (EWF) que incorpora o comportamento viscoelástico dos materiais poliméricos nesta análise. O objetivo do presente trabalho foi desenvolver uma metodologia de avaliação do comportamento mecânico de polímeros termoplásticos, antes e após a exposição à agentes ambientais, empregando-se o método EWF. No estudo, amostras de uma chapa de policarbonato, de fabricação nacional, foram expostas à radiação gama e caracterizadas por meio de ensaios de dureza, de tração, de tenacidade à fratura segundo o método do Trabalho Essencial de Fratura e por microscopia eletrônica de varredura. Os resultados são apresentados e discutidos, mostrando que o comportamento na fratura do policarbonato é influenciado pela irradiação gama.

Palavras-chave: Tenacidade à fratura; Irradiação gama; Trabalho essencial de fratura; Policarbonato.

INFLUENCE OF USE CONDITIONS IN THE FRACTURE TOUGHNESS OF POLYCARBONATE

Abstract

The polymeric materials after exposure to hard environmental agents present degradation by physical and chemical processes. The increasing utilization of these materials under loading had brought, considering his time dependent non linear behavior, to the development of new methods in the fracture mechanics area. These methods to aim incorporate the viscoelastic and viscoplastic behavior of the polymers to the study of the mechanical performance of these materials. Among the most recent methods is detached the Essential Work of Fracture (EWF) technique that embody the viscoelastic behavior of polymeric materials in this analysis. The objective of the present work was to develop an evaluation methodology of the mechanical behavior of the thermoplastics, before and after the exposure to environmental agents, using the EWF method. In the research, samples of a polycarbonate sheet, Brazilian production, were exposed to gamma radiation and characterized by hardness and tension testing, fracture toughness tests according the EWF methodology and by scanning electron microscopy. The results are presented and discussed showing that the fracture behavior of polycarbonate is influenced by gamma irradiation.

Keywords: Fracture toughness; Essential work of fracture; Gamma irradiation; Polycarbonate.

¹ *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

² *Engenheiro e Mestre em Ciências, Professor, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ.*

³ *Aluna do Curso de Engenharia de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ.*

⁴ *Sócio da ABM, Engenheiro e Doutor em Ciências, Professor Emérito, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ.*

INTRODUÇÃO

A mecânica da fratura linear elástica (MFLE) foi desenvolvida por Griffith, em 1920, para materiais frágeis que seguem a lei de Hooke, tais como o vidro. Outros métodos foram desenvolvidos para materiais metálicos dúcteis, como o CTOD e o método da integral J, introduzindo a mecânica da fratura elasto-plástica (MFEP). Modelos mais sofisticados estão sendo desenvolvidos com o objetivo de incorporar o comportamento viscoplástico e viscoelástico de alguns materiais à análise da mecânica da fratura.^[1-3] A aplicação do método da integral J aos polímeros dúcteis tem sido questionada devido a formação de extensas zonas de deformação na ponta da trinca o que viola os limites que asseguram o uso da MFEP. Em consequência, um novo método baseado no conceito do “trabalho essencial de fratura” foi desenvolvido e tem sido aplicado, desde 1970, aos materiais poliméricos.^[4]

O modelo do trabalho essencial de fratura propõe que quando um sólido dúctil trincado está sendo solicitado, o processo de fratura e o processo de deformação plástica ocorrem em duas regiões diferentes, chamadas de zona de processamento da fratura e zona plástica. O método considera que o trabalho associado ao processo de fratura é uma constante do material, enquanto que o trabalho dissipado pela deformação plástica, durante a propagação da trinca, não está associado ao processo de fratura. Assim, o trabalho de fratura total (W_f) pode ser separado em duas partes, o trabalho essencial de fratura (W_e), relacionado com a energia dissipada na criação de duas novas superfícies de fratura, e o trabalho não essencial de fratura (W_p), vinculado à energia dissipada pela deformação plástica na ponta da trinca. Assim, o trabalho de fratura total, $W_f = W_e + W_p$, pode ser determinado pela integral da área sob a curva força-deslocamento ($W_f = \int_0^{l_f} Fdl$, onde l_f é o comprimento na fratura).^[4]

O presente trabalho objetiva avaliar a tenacidade à fratura de um policarbonato, antes e após exposição à radiação gama, utilizando uma metodologia de caracterização baseada no método do trabalho essencial de fratura (EWF).

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Material

Foi estudada uma amostra de policarbonato (PC) marca PCLIGHT, sob a forma de uma chapa comercial com dimensões de 2400mmx1500mm e espessuras de 6mm e de 8mm, fabricada por coextrusão. A Tabela 1 apresenta algumas características comerciais do material estudado.^[5] O PCLIGHT é um produto de linha, produzido industrialmente pela empresa Policarbonatos do Brasil S.A. (São Paulo, SP) e que foi adquirido no comércio do Rio de Janeiro, RJ (Casa do Acrílico).

Para a avaliação do PC foram fabricados, por usinagem mecânica, corpos-de-prova (CP's) para os ensaios mecânicos a partir da chapa “como recebida”. Parte dos CP's permaneceu “como recebido”, enquanto que os demais foram expostos à radiação gama.

O material foi avaliado, antes e após irradiação gama, por meio dos ensaios de dureza, tração e de tenacidade à fratura, utilizando-se a microscopia eletrônica de varredura (MEV) como uma técnica de apoio.

Tabela 1 - Valores típicos de propriedades comerciais da chapa de PCLIGHT (5)

Propriedade	Norma ASTM	Valor
Tensão de escoamento	D638 Tipo I	9,02 psi [62,2 MPa]
Alongamento no escoamento		5,99%
Tensão de ruptura		8,49 psi [58,5 MPa]
Alongamento na ruptura		95%
Tensão de flexão	D790	13,55 psi [93,4 MPa]
Dureza Rockwell	D785	71,2

Irradiação Gama

A irradiação gama foi realizada ao ar em um irradiador de pesquisa dotado de uma fonte de ^{137}Cs , com uma taxa de dose média de 2kGy, na temperatura ambiente. O material irradiado foi exposto a uma dose total de radiação gama de 340 kGy, selecionada considerando a transição dúctil-frágil do policarbonato.^[6]

Ensaio de Dureza

O ensaio de dureza Rockwell foi realizado, na temperatura ambiente, em um durômetro marca Pantec modelo RBS, segundo a norma ASTM D785 [7], utilizando-se a escala M (carga de 100kg e esfera de aço de 12,7mm). Foram ensaiados, por espessura e condição da chapa de PC, 5 (cinco) corpos-de-prova (CP's), fazendo-se, em cada um, 5 (cinco) impressões distribuídas uniformemente ao longo das superfícies dos CP's, calculando-se um valor médio de dureza para cada situação.

Ensaio de Tração

O ensaio de tração foi realizado à temperatura ambiente, em uma máquina universal de ensaios marca EMIC modelo DL10000, segundo a norma ASTM D638 [8]. Para cada espessura e condição da chapa de PC, foram ensaiados 5 (cinco) corpos-de-prova tipo M-III, na velocidade de 10 mm/min, determinando-se, em cada um, a resistência à tração e o alongamento na ruptura.

Ensaio de Tenacidade à Fratura

O ensaio de tenacidade à fratura por flexão em 3 (três) pontos, na temperatura ambiente, foi realizado em uma máquina universal de ensaios, marca EMIC, modelo DL 10000, na velocidade de 1 mm/min, de acordo com o método do trabalho essencial de fratura (EWF) [9]. Foram ensaiados, antes e após irradiação gama, 4 (quatro) corpos-de-prova com entalhe, na espessura de 8mm e com dimensões de 70,6mm x 16mm. Para a realização do ensaio os CP's foram pré-entalhados com um disco de diamante com 0,30mm de espessura em uma máquina de corte Struers, modelo Accertom-2. Em seguida foi realizado um entalhe fino pela pressão de uma lâmina de corte com 0,15mm de espessura, obtendo-se CP's com crescentes profundidades de trinca (a) e, conseqüentemente, decrescentes comprimentos do ligamento (l). A Figura 1 apresenta o desenho esquemático do corpo-de-prova utilizado no ensaio de flexão.

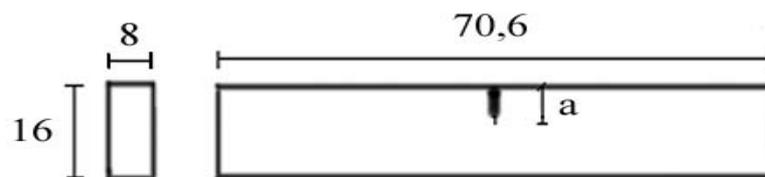


Figura 1: Desenho esquemático do corpo de prova para o ensaio de tenacidade à fratura (dimensões em mm)

Exame Fratográfico

O exame fratográfico foi realizado por microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando-se um equipamento marca JEOL, modelo JSM 5800LV, procurando-se determinar, pela observação direta da topografia das superfícies de fratura dos CP's de mecânica da fratura, a influência do comprimento do ligamento e da irradiação gama no mecanismo de fratura do PC. Antes do exame, as superfícies das amostras foram recobertas com ouro, em uma câmara de vácuo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta o valor médio de propriedades mecânicas, antes e após irradiação gama, determinadas nos ensaios de dureza Rockwell e de tração, podendo-se verificar que a espessura do material e a exposição à radiação gama influenciaram o comportamento mecânico da chapa de PC.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios mecânicos (dureza e tração)

Espessura (mm)	Dose (kGy)	Dureza Rockwell M	Resistência à tração (MPa)	Alongamento na ruptura (%)
6	0	49	59,3	94,5
	340	38	55,2	67,0
8	0	55	64,3	77,3
	340	47	56,3	55,6

As Figuras 2 e 3 apresentam as curvas obtidas no ensaio de flexão em três pontos dos corpos-de-prova de tenacidade à fratura, antes e após irradiação gama.

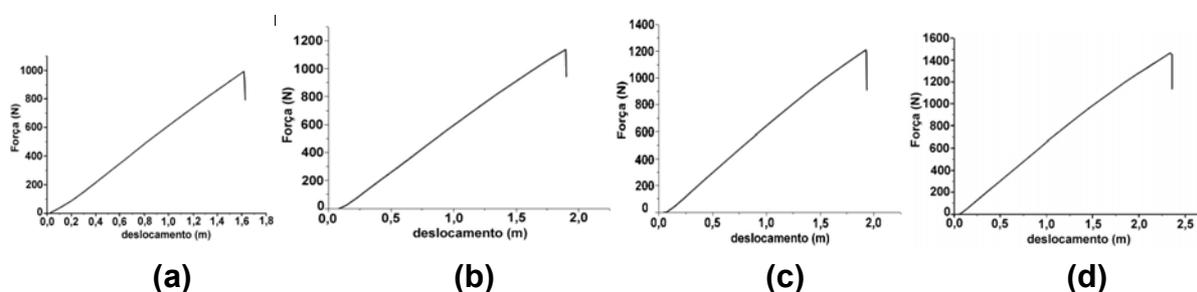


Figura 2: Curvas força-deslocamento em flexão para o PC não irradiado para diferentes comprimentos de ligamento: (a) 13,71mm; (b) 14,38mm; (c) 14,58mm; (d) 14,88mm

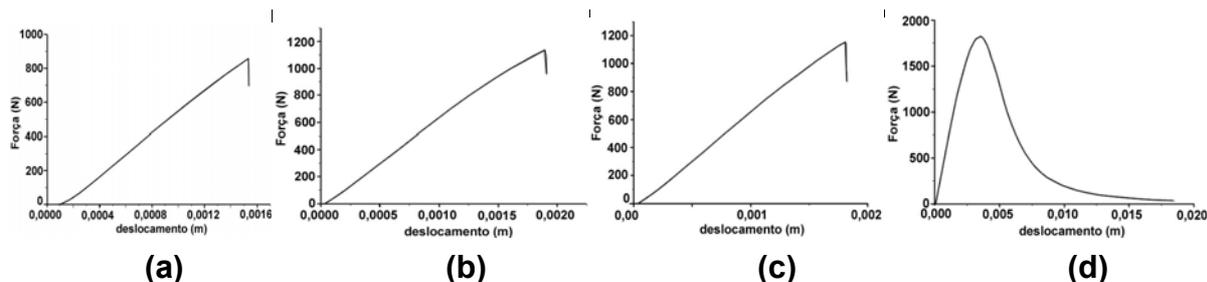


Figura 3: Curvas força-deslocamento em flexão para o PC irradiado para diferentes comprimentos de ligamento: (a) 12,47mm; (b) 13,08mm; (c) 13,98mm; (d) 14,98mm

Verifica-se que a irradiação gama da chapa de PC produz uma redução na dureza, na resistência à tração e no alongamento. Estes resultados podem ser atribuídos à degradação do PC resultante da quebra de cadeias pela sua exposição à radiação gama.^[10] Os valores determinados estão em concordância com os encontrados na literatura, para doses de mesma magnitude.^[11] Verifica-se que, para o PC irradiado, o corpo-de-prova com o maior comprimento do ligamento fraturou com elevada dissipação de energia.

A Tabela 3 mostra, para cada comprimento do ligamento dos corpos-de-prova ensaiados por flexão, antes e após irradiação, o trabalho de fratura total determinado pela integral da área sob a curva força-deslocamento.

Tabela 3 - Trabalho de fratura total em função do comprimento do ligamento, antes e após irradiação gama

Condição do PC	Não irradiado (0kGy)				Irradiado (340kGy)			
Comprimento do ligamento (mm)	13,71	14,38	14,58	14,88	12,47	13,08	13,98	14,98
Trabalho de fratura total (kJ)	0,79	1,05	1,17	1,77	0,61	1,12	1,06	9,68

Na Figura 4 está mostrada a variação do trabalho de fratura total específico com o comprimento do ligamento. O trabalho de fratura total específico foi calculado dividindo-se o valor do trabalho de fratura total pela área do ligamento, que é igual ao produto do seu comprimento pela espessura do corpo-de-prova.

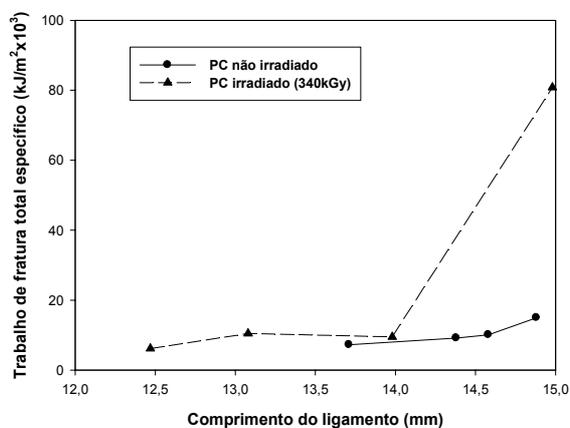


Figura 4 - Variação do trabalho de fratura total específico em relação ao comprimento do ligamento, antes e após irradiação gama

Observa-se que o polycarbonato não irradiado apresenta, em relação ao irradiado, um menor valor para o trabalho de fratura total específico, o que é compatível com a observada redução na dureza do PC após sua exposição à radiação gama. Verifica-se, ainda, que o corpo-de-prova com o maior comprimento do ligamento do PC irradiado apresentou um grande aumento no valor do trabalho de fratura total específico, indicando, como sugerido pelo aspecto da curva força-deslocamento, que o material apresenta uma alta plasticidade nestas condições de ensaio.

Exame Fratográfico

Verifica-se, visualmente, que a chapa de polycarbonato é modificada pela exposição à radiação gama; o PC, que “como recebido” é incolor e transparente, apresenta, após a irradiação gama, um escurecimento que atinge, para a dose de 340kGy, uma cor marrom muito forte. Esta mudança de coloração indica que a exposição à radiação gama produz uma intensificação na formação de grupos cromóforos, devido à cisão da cadeia principal e a formação de radicais livres que são associados ao amarelamento do material.^[12]

As Figura 5 a 7 apresentam aspectos típicos das superfícies de fratura dos corpos-de-prova (CP's) ensaiados em flexão, podendo-se identificar as mudanças produzidas pela irradiação gama no comportamento mecânico do material.

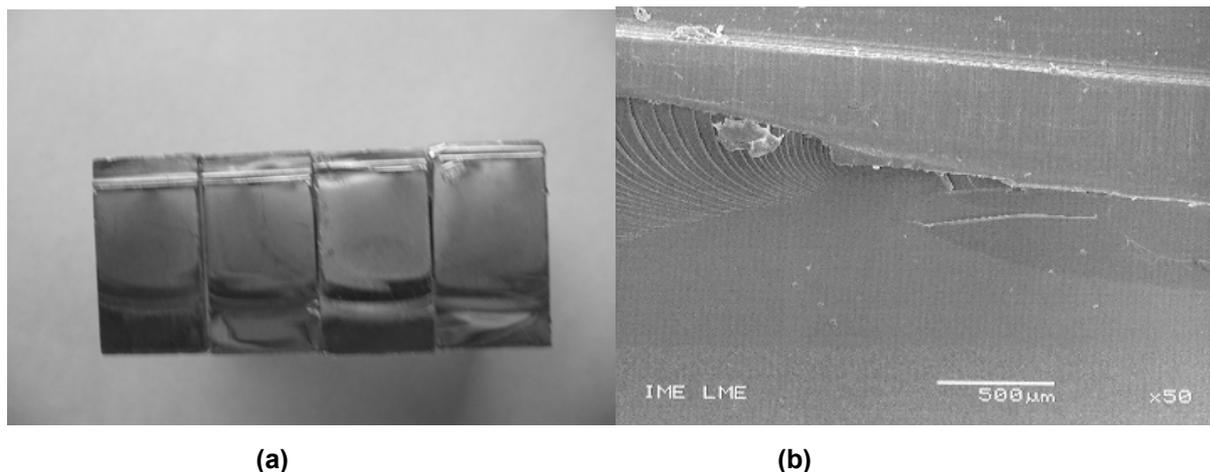


Figura 5 - Fotografias das superfícies de fratura dos CP's de flexão do polycarbonato não irradiado: (a) aspecto macroscópico; (b) microfotografia, por MEV, do CP com comprimento do ligamento igual a 14,58mm

Verifica-se que o PC não irradiado, independentemente do comprimento do ligamento, apresenta superfícies de fratura planas e cantos vivos (Figura 5). Este aspecto indica que a fratura do material irradiado ocorreu com baixa dissipação de energia devido, provavelmente, à baixa velocidade de ensaio e ao raio muito pequeno do entalhe, proporcionando condições de deformação plana que restringiram a ocorrência de deformação plástica.^[13]

As superfícies de fratura dos corpos-de-prova do material irradiado têm, com exceção do com maior comprimento do ligamento, aspectos fratográficos semelhantes (Figura 6a). Verifica-se que a superfície de fratura apresenta, logo abaixo do entalhe, uma zona lisa que pode ser associada à nucleação da trinca seguida por uma zona rugosa com estrias que se desenvolvem no sentido de propagação da trinca, mostrando que o material apresenta um comportamento dúctil (Figura 6b).



Figura 6 - Fotografias das superfícies de fratura dos CP's de flexão do policarbonato irradiado: (a) aspecto macroscópico; (b) microfotografia, por MEV, do CP com o menor comprimento do ligamento (12,47mm)

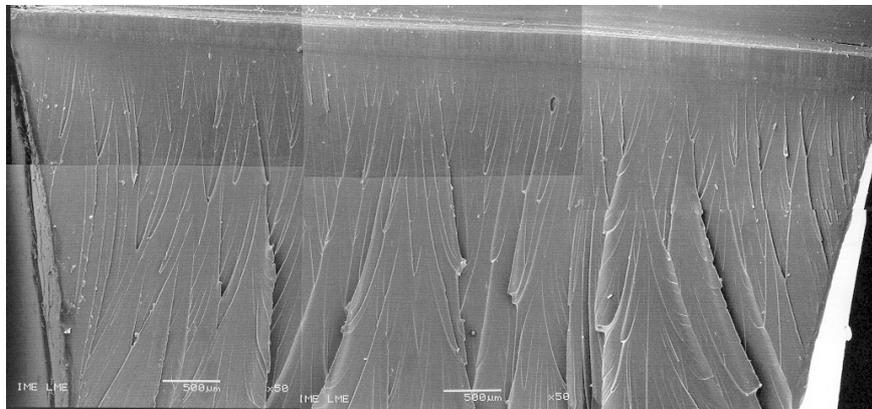


Figura 7 - Microfotografia, por MEV, da superfície de fratura do CP de flexão do policarbonato irradiado com o maior comprimento do ligamento (14,98mm)

A superfície de fratura do corpo-de-prova irradiado com o maior comprimento do ligamento apresenta um aspecto particular, caracterizado por duas zonas distintas (Figura 6a): uma adjacente às bordas, em tensão plana, composta por zonas de cisalhamento, e outra, no centro, em deformação plana, que se apresenta mais plana com estrias que se desenvolvem na direção de propagação da trinca, a partir da raiz do entalhe (Figura 7). Este aspecto topográfico indica que a fratura ocorreu com uma elevada dissipação de energia, caracterizando uma fratura altamente dúctil.

A análise fratográfica por MEV confirmou os resultados obtidos no ensaio de tenacidade à fratura.

CONCLUSÕES

Tendo em vista os resultados dos ensaios realizados podem ser apresentadas as seguintes conclusões:

- 1) O comportamento na fratura do policarbonato é influenciado pela degradação resultante da sua exposição à radiação gama.
- 2) A morfologia de fratura do policarbonato é função das condições de solicitação e emprego e depende do modo como ocorre a propagação da trinca.

- 3) O método do trabalho essencial de fratura (EWF) é adequado para caracterizar o comportamento na fratura de materiais poliméricos.
- 4) Foi estabelecida uma metodologia preliminar que permite aplicar, com segurança, o método do trabalho essencial de fratura (EWF) aos materiais poliméricos.

Os trabalhos continuam em nosso laboratório visando o desenvolvimento da metodologia estudada visando uma melhor aplicação da mecânica à fratura aos polímeros termoplásticos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPERJ, CAPES e CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 KNOTT, J.F. Fundamentals of Fracture Mechanics. London: Butterworths, 1973.
- 2 HERTZBERG, R.W. Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1976.
- 3 ANDERSON, T.L. Fracture Mechanics Fundamentals and Application. New York: CRC Press, 2nd edition, 1995.
- 4 WU, J.; MAI, Y.-W. The Essential Fracture Work Concept for Toughness Measurement of Ductile Polymers: Polymer Engineering and Science, v.36, n.18, p.2275-2288, 1996.
- 5 Catálogo comercial do policarbonato PCLIGHT, Policarbonatos do Brasil S.A., São Paulo, SP, 2004.
- 6 SEGUCHI, T.; YAGI, T.; ISHIKAWA, S.; SANO, Y. New material synthesis by radiation processing at high temperature - polymer modification with improved irradiation technology. Radiation Physics and Chemistry, v.63, p.35-40, 2002.
- 7 Norma ASTM D785 - Rockwell hardness of plastics and electrical insulating materials - Standard test methods for - American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1998.
- 8 Norma ASTM D638 - Tensile properties of plastics - Standard test method for. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1996.
- 9 ESIS TC-4 Group - Testing protocol for essential work of fracture. Structural Integrity Society (ESIS), 1997.
- 10 ACIERNO, D.; LA MANTIA, F.P.; TITOMANLIO, G.; CALDERARO, E.; CASTIGLIA, F. γ -Radiation Effects on a Polycarbonate. Radiation Phys. Chem., v.16, p.95-99, 1980.
- 11 BILLMEYER, JR., F.W. Textbook of Polymer Science. New York: John Wiley & Sons, Inc., 3rd Ed., 1984.
- 12 FACTOR, A.; CARNAHAN, J.C.; DORN, S.B. The chemistry of γ -irradiated bisphenol-A polycarbonate. Polym. Deg. Stab., v.45, p.127-137, 1994.
- 13 HULL, D.; OWEN, T.W. Interpretation of fracture surfaces features in polycarbonate. J. Polym. Sci.: Polym. Phys. Ed., v.11, p.2039-2055, 1973.