

COMPORTAMENTO NA FRATURA DE LAMINADO EPÓXI / FIBRA DE VIDRO: EFEITO DA EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO GAMA ¹

Flávio Giordano Vieira Hipólito²

Claudia Maria Chagas Bonelli³

João Carlos Miguez Suarez⁴

Resumo

As resinas epoxídicas têm se destacado como um material que encontra aplicação em diversos segmentos tecnológicos, sendo a cisão de cadeias e a reticulação final os principais agentes determinantes de suas propriedades. A resina epoxídica reforçada por fibra de vidro é aplicada, freqüentemente, em ambientes expostos às radiações, tais como, instalações nucleares e locais de elevada incidência da radiação solar. Em conseqüência, torna-se necessário um melhor conhecimento do modo como esses tipos de radiações influenciam as propriedades do material, na medida em que a sua utilização envolve problemas de segurança de instalações. No presente estudo amostras de um compósito epóxi / fibra de vidro (GFRE), de fabricação nacional, irradiadas ao ar com varias doses de radiação gama, foram avaliadas por meio de ensaios mecânicos (dureza e flexão) e físico-químicos (análise termogravimétrica e espectroscopia no infravermelho), tendo sido estudado, por microscopia eletrônica de varredura, o comportamento na fratura do material. Os resultados dos ensaios mostraram que o comportamento do compósito é influenciado pelo processo de irradiação gama e que a variação nas propriedades mecânicas resulta, principalmente, da degradação produzida na matriz epoxídica. Esses resultados são apresentados e discutidos.

Palavras-chave: Resina epoxídica; Fibra de vidro; Degradação; Irradiação gama.

FRACURE BEHAVIOR OF FIBERGLASS FABRIC REINFORCED EPOXY LAMINATE: EFFECT OF GAMMA RADIATION EXPOSURE

Abstract

Epoxy resins has important applications in several technological branches and chain scission and crosslinking are the principal agents that governing their properties. Epoxy resin reinforced with glass fiber is used, frequently, in ambient exposed to high-energy radiations such us nuclear plants and sites with excessive sunlight radiation. In consequence a better knowledge of the influence of the radiations on materials properties is essential for the human security. In the present work samples of a Brazilian fiberglass fabric reinforced epoxy composite (GFRE) gamma irradiated in the air were evaluated through mechanical (hardness and flexure) and physicochemical (infrared spectroscopy and thermal gravimetric analysis) testing. The fracture behavior of composite was investigated by scanning electron microscopy. It was observed that gamma radiation induce changes in mechanical properties due to, principally, the degradation of polymeric matrix. These results are presented and discussed.

Key words: Epoxy resin; Glass fiber; Degradation; Gamma irradiation

¹ *Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ*

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

³ *Engenheiro e Doutor em Ciências, Pesquisador, 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

Os materiais poliméricos (plásticos, borrachas e fibras) têm largo emprego no cotidiano contemporâneo, sobretudo quando conjugados com outros materiais. A sua otimização tecnológica tem permitido o desenvolvimento de novas aplicações, contribuindo para a redução dos custos de processamento e de obtenção da matéria prima.

Várias aplicações industriais necessitam de materiais poliméricos com características específicas para serem utilizados na presença de radiações ionizantes o que torna o estudo dos efeitos das radiações sobre esses materiais de interesse tecnológico. Dentre os vários exemplos onde os materiais poliméricos ficam expostos às radiações de alta energia podem ser citados: materiais utilizados nas indústrias aeroespacial e médica devem apresentar estabilidade quando submetidos a radiações, a segurança de aeronaves pode ser comprometida pela exposição permanente às radiações ultravioletas e de alta energia, produtos médicos e farmacêuticos são esterilizados por radiação gama, a indústria eletroeletrônica utiliza materiais com propriedades mecânicas modificadas pela exposição à radiações ionizantes e vários tipos de produtos devem ser utilizados em situações de exposição ao tempo. Dentre os materiais plásticos, as resinas epoxídicas têm se destacado como um material para aplicação em diversos segmentos tecnológicos sendo a natureza química dos monômeros iniciais e a alta densidade de reticulação final os principais agentes determinantes de suas propriedades. A resina epoxídica, ao ser conjugada a outros materiais, permite a obtenção de propriedades condizentes com diversas aplicações, ao combinar desempenho e versatilidade, notadamente em relação ao comportamento mecânico. A resina epoxídica reforçada por fibra de vidro tem sido aplicada em ambientes de reatores, em circuitos eletrônicos de instalações nucleares, como revestimento de recipientes de lixo nuclear e em ambientes de extrema exposição à radiação solar, muitas vezes submetida a cargas [1,2].

Em conseqüência, o interesse pelo efeito das radiações ionizantes nas propriedades de materiais empregados em diversos segmentos tecnológicos tem sido tema de constante pesquisa. Todavia, ainda é necessário um melhor conhecimento das modificações produzidas nos materiais poliméricos pela sua exposição às radiações ionizantes, na medida que a utilização dos mesmos nestas condições pode influenciar a sociedade. Assim, o presente trabalho objetiva analisar o efeito da magnitude da dose de radiação gama no processo de envelhecimento de um compósito de matriz epoxídica reforçada com fibra de vidro.

EXPERIMENTAL

No presente trabalho foi estudado um laminado comercial (Eletrisol Indústria de Isolantes S.A., São Paulo, SP), placas retangulares com 4mm de espessura, com características dielétricas para emprego em equipamentos eletro-eletrônicos. O laminado, compósito de matriz de resina epoxídica (ER) reforçada com 21 camadas de tecido em tela de fibra de vidro tipo E (18 fios no urdume, 12 na trama, 205g/m² de gramatura e 0,2mm de espessura) foi fabricado por prensagem a quente. O sistema epóxi da matriz é formado pela mistura da resina tipo XB-81370.02 (Dow Química S.A., São Paulo, SP) com o agente cura dicianidamida e com o catalisador 2-metilimidazol, na razão estequiométrica, em peso (phr), de 100:3:0,4. O material foi irradiado ao ar em um equipamento dotado de uma fonte de ⁶⁰Co, nas doses de

250kGy, 500kGy, 750kGy, 1000kGy, 1250kGy, 1500kGy, 1750kGy e 2000kGy, em uma taxa de dose de 2,5kGy/h.

O laminado foi caracterizado, antes e após irradiação, por meio de ensaios mecânicos e físico-químicos. Nos ensaios mecânicos (dureza e flexão) foram testados, em cada condição do material, corpos de prova longitudinais obtidos por usinagem mecânica do laminado. Nos ensaios físico-químicos (análise termogravimétrica e espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier) foram utilizadas amostras extraídas por raspagem da resina epoxídica em cada face do compósito.

O ensaio de dureza Rockwell foi realizado em um durômetro marca Wolpert-H71-A, segundo a norma ASTM D785 [3], utilizando-se a escala M (carga de 100kg e esfera de aço de 12,7mm). Foi ensaiada uma amostra por condição do laminado, fazendo-se, em cada uma, 5 (cinco) impressões.

O ensaio de flexão em 3 pontos, segundo a norma ASTM D790M [4], foi executado, na temperatura ambiente, em uma máquina universal de ensaios marca Emic, modelo DL10000, na velocidade de ensaio de 1,70 mm/min. Foram testados, para cada condição, 6 (seis) corpos de prova com dimensões de 80mm x 10mm x 5mm, determinando-se a tensão máxima em flexão.

A análise termogravimétrica (TGA) foi realizada em um equipamento Shimadzu, modelo TGA-50, dispendo de um par termoeletrico de cromel-alumel e de um analisador computadorizado. A calibração do termopar foi realizada com alumel ($T_m = 163^\circ\text{C}$), níquel ($T_m = 354^\circ\text{C}$) e perkallo ($T_m = 596^\circ\text{C}$). As amostras, pesando, aproximadamente, 2,0 mg, foram colocadas em cadinhos de alumínio e aquecidas, em atmosfera de nitrogênio, de 30°C até 800°C , na velocidade de $20^\circ\text{C}/\text{min}$. Foi determinada, para cada condição do compósito, a temperatura de início de perda de massa considerada igual a do começo da transição (*onset*).

A espectroscopia no infravermelho (FTIR) foi executada, em um espectrômetro Nicolet-Protégé 460, na região entre $4000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$, empregando-se a técnica de reflectância difusa (DRIFT) e um detector de DTGS. Os espectros em absorbância, obtidos com resolução de 2 cm^{-1} e 200 varreduras por ensaio, foram convertidos para unidades Kubelka-Munck (KM). Para o monitoramento da degradação do compósito causada pela exposição à radiação gama foram determinados dois índices de oxidação, IO , calculados como uma relação entre a absorbância referente à vibração de estiramento da carbonila (C=O) em 1716 cm^{-1} e, respectivamente, a intensidade dos "picos" de absorção em 3420 cm^{-1} , correspondente ao estiramento da banda O-H (IO_1) e em 915 cm^{-1} , relativo ao estiramento da banda epóxi (IO_2) [5]:

$$\text{IO}_1 = A(1716) / A(3420) \text{ e} \\ \text{IO}_2 = A(1716) / A(915)$$

A análise fractográfica foi realizada pela observação direta, visual e por microscopia, das superfícies de fratura de amostras retiradas dos corpos de prova de flexão. No exame visual as amostras foram examinadas a olho nu e com o auxílio de uma lupa com 10x de aumento. No exame microscópico foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV), marca Jeol, modelo JSM 5800LV, tendo as amostras, antes do exame, sido recobertas com ouro em câmara de vácuo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta o valor médio de propriedades mecânicas, antes e após a exposição aos raios gama, determinadas nos ensaios de dureza e de flexão, podendo-se verificar que a irradiação gama influencia o comportamento mecânico do laminado.

Os valores de dureza do laminado apresentam uma variação muito pequena com o aumento da dose de radiação gama indicando que a irradiação, na faixa de doses estudada, não deve produzir grandes alterações nas propriedades mecânicas dos materiais componentes do laminado.

Verifica-se, todavia, que a resistência em flexão do laminado não apresenta uma variação coerente com a dureza, pois apresenta uma diminuição contínua com o aumento da dose de radiação. Observa-se que o valor da resistência varia de 329MPa, no material “Como recebido” (não irradiado), para 196MPa no irradiado com 2000kGy, com uma queda mais acentuada a partir da dose de 1000kGy. Esta sensível redução na resistência, cerca de 40%, pode ser interpretada considerando que a irradiação gama do compósito produz alterações macromoleculares na resina epoxídica que reduzem as ligações químicas responsáveis pela união da matriz epoxídica com o reforço de fibra de vidro [6,7]. Esta menor compatibilização entre a matriz e o reforço diminui a resistência interfacial, facilita a separação dos dois componentes e torna mais provável a ocorrência de delaminação no compósito. Dessa maneira ocorre uma diminuição na resistência em flexão do compósito, pois o comportamento em flexão é grandemente influenciado pela propagação de trincas ao longo das interfaces.

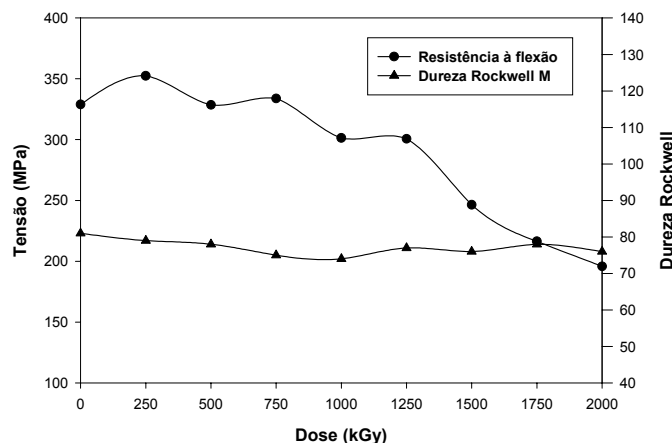


Figura 1. Resultados dos ensaios mecânicos, dureza e flexão, do laminado, antes e após irradiação gama

A Figura 2 mostra os valores obtidos nos ensaios físico-químicos (TGA e FTIR) da resina epoxídica: temperatura de início de perda de massa, T_1 e T_2 , e índice de oxidação, IO_1 e IO_2 , antes e após irradiação, que indicam a ocorrência de modificações estruturais no material.

A análise termogravimétrica, antes e após irradiação, mostra que a degradação da resina epoxídica ocorre em dois estágios. Observa-se, independentemente da condição do laminado, que o aspecto dos termogramas é bastante similar, com dois pontos de inflexão na curva, caracterizando dois sucessivos estágios de degradação

e, portanto, duas temperaturas de início de perda de massa (T_1 e T_2). Este fenômeno, observado em todas as análises, é creditado à desidratação e à formação de uma estrutura poliaromática no 1º estágio, com domínios de carbono fracamente organizados em camadas paralelas; e à reação termo-oxidativa que conduz à degradação carbonácea do material no 2º estágio [8].

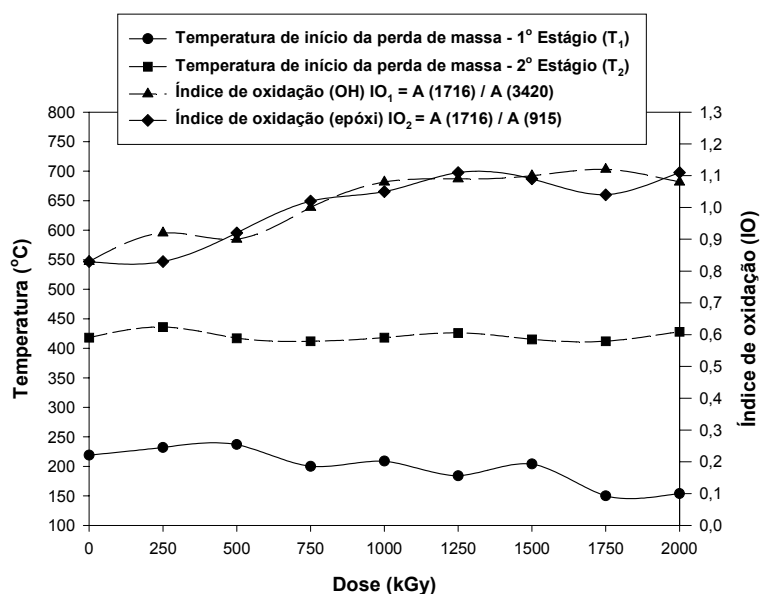


Figura 2. Resultados obtidos nos ensaios físico-químicos (TGA e FTIR) da resina epoxídica, antes e após irradiação gama

As temperaturas de início de perda de massa no 1º estágio (T_1) e no 2º estágio (T_2), determinadas a partir das curvas TGA, estão apresentadas na Figura 2, em função da dose de radiação gama. No 1º estágio, a temperatura de início da degradação aumenta com a irradiação nas doses iniciais, 250kGy e 500kGy, mostrando uma redução com o crescimento das doses. No 2º estágio, após um aumento inicial no material irradiado com a menor dose, 250 kGy, observa-se que a temperatura oscila em torno de um valor médio, podendo-se considerar, para efeitos práticos, que a temperatura permanece constante. O aumento observado na temperatura de início da perda de massa em ambos os estágios de degradação indica que a irradiação gama ao ar produz, inicialmente, uma cura adicional da resina epoxídica [9]. A redução da temperatura na irradiação com maiores doses pode ser atribuída a ocorrência de cisão de cadeias e a conseqüente redução na reticulação fazendo com que menor energia seja requerida para a degradação do material em produtos voláteis [10]. Assim, pode ser sugerido que a cisão acelera o rompimento das ligações de hidrogênio dos anéis benzênicos, facilitando a desidratação e antecipando a formação da estrutura poliaromática. A estabilidade verificada no 2º estágio, onde há predominância da estrutura poliaromática; pode ser atribuída a existência desses grupos aromáticos que, por serem mais resistentes à radiação [6,11], mantêm o intervalo de temperatura necessário à calcinação carbonácea. Esta análise indica que a exposição a maiores doses de radiação gama reduz a estabilidade térmica da resina epoxídica facilitando a degradação do compósito [12,13].

Os espectros obtidos na espectroscopia no infravermelho da resina epoxídica, independentemente da condição do laminado, são bastante semelhantes. Verifica-se que, embora a irradiação gama não tenha produzido modificações significativas no aspecto geral dos espectros, ocorreu redução na intensidade das bandas de absorvância do material irradiado, principalmente para as mais baixas doses de radiação, indicando que o material está apresentando modificações estruturais relacionadas com as cadeias poliméricas. A menor absorvância das amostras irradiadas sugere que a irradiação gama produziu uma cura adicional da resina epoxídica e que possa ter ocorrido absorção de oxigênio atmosférico [12,14].

A comparação dos espectros FTIR das amostras, antes e após irradiação, permite detectar redução da intensidade dos grupamentos OH (3420cm^{-1}) e epóxi (915cm^{-1}) e o crescimento da banda da carbonila C=O (1716cm^{-1}). Na análise dos espectros de FTIR a carbonila foi utilizada como parâmetro das modificações oxidativas ocorridas no material, considerando que a irradiação ao ar pode contribuir com alterações na estrutura interna por inclusões de átomos de oxigênio presentes na atmosfera, ocasionando aumento na absorvância na faixa de 1716cm^{-1} do espectro. Os índices de oxidação, IO_1 e IO_2 , calculados considerando essas vibrações características, estão apresentados na Figura 2, em função da dose de radiação gama.

Observa-se que ocorre um aumento praticamente contínuo dos índices de oxidação nas duas bandas de referência, que mostram razoável proporcionalidade entre as mesmas. O crescimento do grupo carbonila com o aumento da dose de radiação está associado ao crescimento da presença de moléculas de dipolo produzidas por reações químicas resultantes da cisão da cadeia molecular [15]. Estes resultados indicam que a resina epoxídica apresentou oxidação com o aumento da dose de radiação, o que levou ao rompimento das ligações das ramificações com a cadeia principal.

A análise por FTIR permite verificar que a matriz epoxídica apresenta cisão de cadeias e oxidação, conforme já discutido na análise termogravimétrica, sugerindo que esses fenômenos foram os responsáveis pela degradação do compósito e suportando os resultados obtidos nos ensaios mecânicos.

A análise fractográfica das superfícies de fratura de amostras rompidas por meio de esforços mecânicos pode fornecer informações importantes a respeito da natureza dos processos de falha envolvidos. Uma interpretação adequada dos aspectos topográficos observados nestas superfícies permite uma melhor compreensão dos mecanismos atuantes nos estágios de iniciação e de propagação da fratura.

A Figura 3 apresenta o aspecto macroscópico dos corpos de prova do compósito ensaiado em flexão podendo-se identificar as mudanças produzidas pela irradiação gama no comportamento mecânico do material.

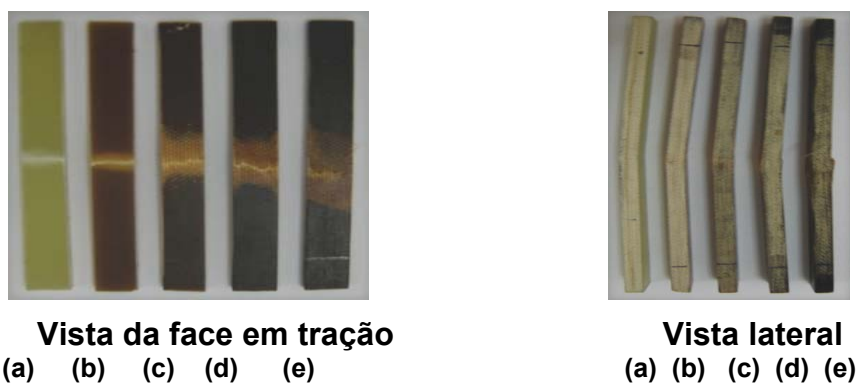


Figura 3. Aspectos macroscópicos de corpos de prova ensaiados em flexão: (a) “Como recebido”; (b) 250kGy; (c) 1500kGy; (d) 1750kGy; (e) 2000kGy

O exame visual mostra que a cor do laminado é modificada pela exposição à radiação gama; o material “Como recebido” tem uma cor esverdeada clara, apresentando, já a partir da primeira dose de radiação gama (250kGy), um escurecimento progressivo até atingir, nas doses mais elevadas, um marrom muito forte. Esta mudança de coloração, conforme já observado no FTIR, evidencia a presença de grupos cromóforos e a sua intensificação com o aumento da dose de radiação. Observa-se que a falha ocorre, predominantemente, na face em tração e que a deformação macroscópica do material está limitada à região no entorno do local de aplicação da solicitação mecânica onde ocorre, de modo geral, uma mudança na coloração do material. Verifica-se que nenhum dos corpos de prova ensaiados rompeu completamente, permanecendo as duas extremidades da seção reta unidas por camadas do laminado, e o principal mecanismo de fratura foi a delaminação das camadas do compósito, que aumenta com a dose de radiação.

A Figura 4 apresenta fotomicrografias típicas, por MEV, das superfícies de fratura de corpos-de-prova de flexão do laminado, “Como recebido” e irradiados.

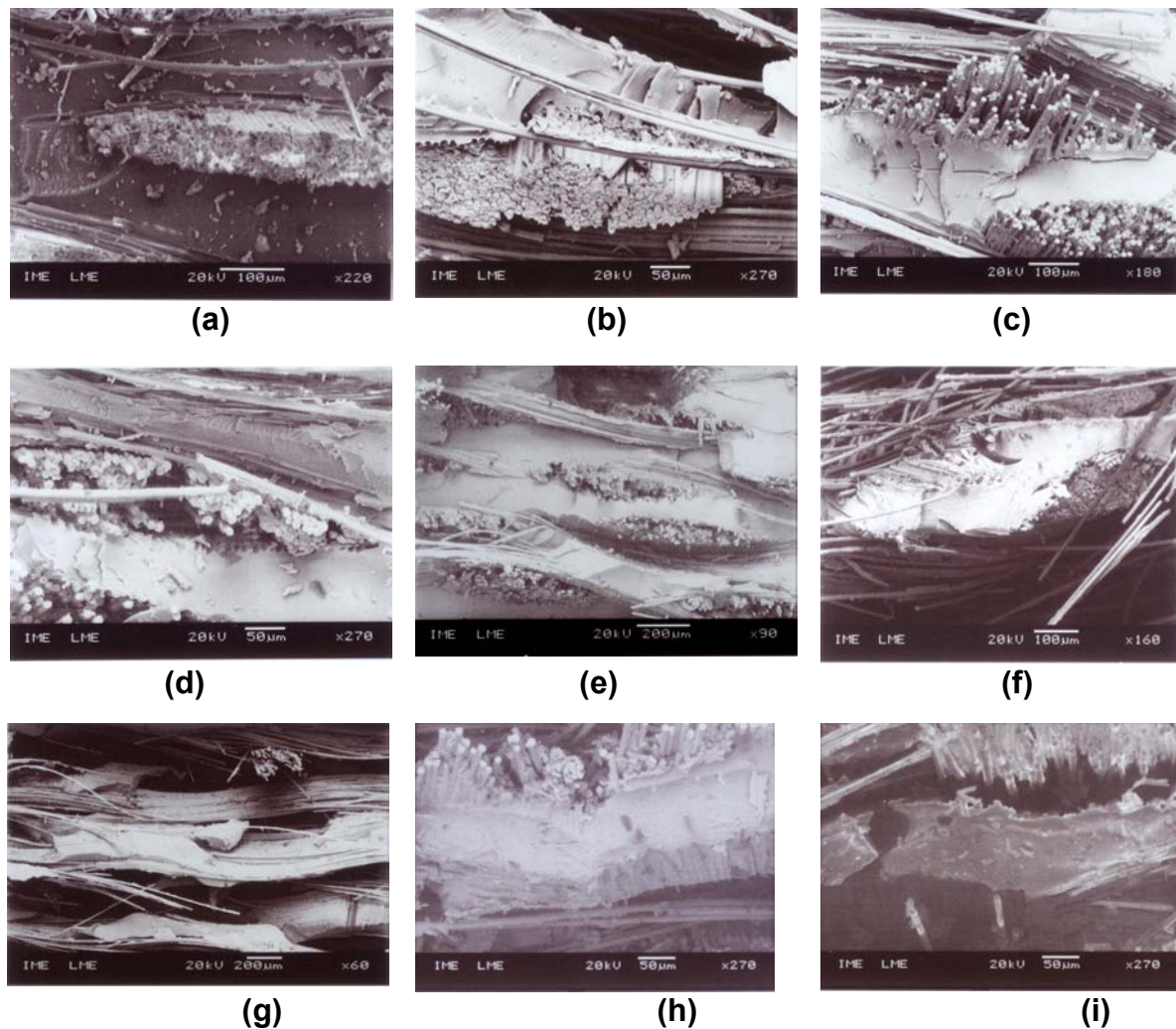


Figura 4. Fotomicrografias de superfícies de fratura de corpos de prova do laminado ensaiados em flexão: (a) “Como recebido”; (b) 250kGy; (c) 500kGy; (d) 750kGy; (e) 1000kGy; (f) 1250kGy; (g) 1500kGy; (h) 1750kGy; (i) 2000kGy

No exame sob pequenos aumentos observa-se que a irradiação gama não modifica substancialmente o modo de fratura em flexão. Todavia, sob maiores aumentos, é possível identificar as modificações que ocorrem no mecanismo de fratura dos compósitos à medida que se aumenta a dose de radiação gama. Verifica-se, assim, que o laminado apresentou, dependendo do nível da irradiação gama, superfícies de fratura irregulares, com regiões rugosas ou planas, onde podem existir áreas de clivagem, trincas, “marcas de rios” e “saca-fibra”.

O material “Como recebido” e irradiado com as menores doses apresentou uma boa adesão interfacial entre a matriz e a fibra, tendo a sua falha ocorrido, predominantemente, no plano da matriz epoxídica. A exposição a maiores doses de radiação gama aumenta a degradação do material reduzindo a adesão interfacial, observando-se que o “saca-fibra” e a degradação da matriz epoxídica, notadamente na interface onde ocorre descolamento das fibras, aumentam com a dose de radiação. Verifica-se que as superfícies de fratura das amostras irradiadas com doses maiores apresentam áreas de clivagem, trincas e “marcas de rios”; aspectos típicos de um mecanismo de fratura frágil.

Foi verificado que a irradiação gama prejudica a adesão fibra-matriz e que, para as mais altas doses de radiação gama, ocorre o completo descolamento da fibra de vidro da matriz de resina epoxídica.

O comportamento na fratura de um compósito está relacionado, principalmente, com o desempenho da interface matriz-reforço. A rigidez e a resistência em flexão dependem das condições da interface; quanto maior a degradação interfacial, menores deverão ser a rigidez e a resistência do compósito [16]. A irradiação gama do compósito ao degradar a resina epoxídica reduz as ligações químicas responsáveis pela união da matriz epoxídica com o reforço de fibra de vidro, reduzindo a compatibilidade e a adesão entre esses componentes. Esta degradação reduz a resistência interfacial e prejudica a capacidade da matriz em transmitir esforços para o reforço, facilita a separação das camadas e torna mais provável a ocorrência de delaminação. Em consequência, as fibras de vidro, que nas doses de radiação aplicadas não são praticamente degradadas, passam a ser as únicas responsáveis pela resistência mecânica do laminado, o qual deve mostrar um nível de resistência da mesma ordem de grandeza que o das fibras de vidro [17,18].

CONCLUSÕES

A análise dos resultados permite apresentar as seguintes conclusões:

1. A resistência mecânica em flexão do compósito de matriz epoxídica reforçada por fibra de vidro tende a diminuir com a sua exposição à radiação gama, quanto maior a dose de radiação, menor a resistência mecânica.
2. A degradação da matriz epoxídica aumenta com a dose de radiação, sendo a cisão das cadeias o mecanismo predominante na degradação.
3. O aumento da degradação da matriz reduz a resistência interfacial, facilitando a delaminação e diminuindo a rigidez e a resistência em flexão do laminado.
4. O aumento da dose de radiação gama ocasiona uma transição dúctil-frágil no comportamento em flexão do laminado de matriz epoxídica reforçada com fibra de vidro.
5. Os mecanismos de fratura do laminado, determinados por microscopia eletrônica de varredura, confirmam os resultados obtidos nos ensaios mecânicos e físico-químicos.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio das agências CAPES, CNPq e FAPERJ.

REFERÊNCIAS

- 1 REICHMANIS, E.; FRANK, C.W.; O'DONNELL, J.H. Radiation effects on polymeric materials: A brief overview. In: **Irradiation of polymeric materials**, New York: Elsevier Science Publishers Ltd, 1993.
- 2 VIGNOUD, L.; DAVID, L.; SIXOU, B.; VIGIER, G. Influence of electron irradiation on the mobility and on the mechanical properties of DGEBA/TETA epoxy resins. **Polymer**, v. 42, 2001, p. 4657-4665.
- 3 Norma ASTM D785. Standard method of test for Rockwell hardness of plastics and electrical insulating materials. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1993.
- 4 Norma ASTM D790M. Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials (metric). Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1993.
- 5 GONZÁLES-BENITO, J. The nature of the structural gradient in epoxy curing at a glass fiber/epoxy matrix interface using FTIR imaging. **Journal Colloid and Interface Science**, v. 267, 2003, p. 326-332.
- 6 CLOUGH, R.L.; GILLEN, K.T.; DOLE, K. Radiation resistance of polymers and composites. In: **Irradiation effects on polymers**, New York: Elsevier Science Publishers Ltd, 1991.
- 7 MEGUSAR, J. Low temperature fast-neutron and gamma irradiation of glass fiber-epoxy composite. Part II: Structure and chemistry. **Journal of Nuclear Materials**, v. 230, 1996, p. 233-241.
- 8 ROSE, N.; LE BRAS, M.; BOURBIGOT, S.; DELOBEL, R. Thermal oxidative degradation of epoxy resins: evaluation of their heat resistance using invariant kinetic parameters. **Polymer Degradation and Stability**, v. 45, 1994, p. 387-397.
- 9 KUMAR, B.G., SINGH, R.P., NAKAMURA T. Degradation of carbon fiber-reinforced epoxy composites by ultraviolet radiation and condensation. **Journal of Composites Materials**, v. 36, 2002, p. 2713-2733.
- 10 PRIME, R.B. Thermosets. In: **Thermal Characterization of Polymeric Materials**, New York: Academic Press, 1981.
- 11 O'DONNELL, J.H. Chemistry of radiation degradation of polymers. In: **Radiation effects on polymers**. Washington: American Chemical Society, 475 ACS Symposium Series, 1991.
- 12 HEPBURN, D.M.; KEMP, I.J.; COOPER, J.M. Degradation of filled epoxy resin surfaces. **Polymer Degradation and Stability**, v. 70, p. 245-151, 2000.
- 13 STARTSEV, O.V.; KROTOV, A.S.; GOLUB, P.D. Effect of climatic and radiation ageing on properties of VPS-7 glass fibre reinforced epoxy composite. **Polymer Degradation and Stability**, v. 63, p. 353-358, 1999.
- 14 MEGUSAR, J.; Low temperature fast-neutron and gamma irradiation of glass fiber / epoxy composite. Part 2: Structure and chemistry. **Journal of Nuclear Materials**, v. 230, 1996, p. 233-241.
- 15 NISHIURA, T.; KATAGIRI, K.; NISHIJIMA, S.; OKADA, T.; NAKAHARA, S. Gamma-ray irradiation effects on interlaminar tearing strength of epoxy-based FRP. **Journal of Nuclear Materials**, v. 174, 1990, p. 110-117.

- 16 MEGUSAR, J.; Low temperature fast-neutron and gamma irradiation of glass fiber / epoxy composite. Part 1: deformation and fracture. **Journal of Nuclear Materials**, v. 228, 1996, p. 168-175.
- 17 KNOX, C.E. Fiberglass reinforcement. In: **Handbook of composites**. Amsterdam: Van Nostrand Reinhold Company, 1980.
- 18 COLLINGS, T.A.; HARVEY, R.J.; DALZIEL, A.W. The use of elevated temperature in the structural testing of FRP components for simulating the effects of hot and wet environmental exposure. **Composites**, v. 24, n. 8, 1993, p. 625-634.