

INFLUÊNCIA DO ENVELHECIMENTO NO DESEMPENHO BALÍSTICO DE UM COMPÓSITO DE ARAMIDA¹

Guilherme Araujo Bittencourt²
 Ricardo Pondé Weber³
 João Carlos Miguez Suarez⁴

Resumo

A necessidade de materiais de alta resistência e elevada tenacidade para emprego em proteções balísticas, tem levado ao desenvolvimento de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras. Todavia, os materiais poliméricos quando expostos à agentes ambientais podem apresentar alterações que, frequentemente, modificam as suas propriedades. No presente trabalho foi estudado o desempenho balístico de um laminado de tecido de aramida com policloropreno (CR) envelhecido artificialmente por irradiação gama, em uma faixa de doses entre 40 kGy e 200 kGy. O compósito, antes e após irradiação gama, foi caracterizado por meio de ensaios físico-químicos (TGA, DSC e FTIR) e mecânicos (tração e adesão) e submetido a teste balístico. Os resultados obtidos mostraram que a irradiação gama produz degradação da poliaramida, a qual apresenta cisão da cadeia. Todavia, verificou-se que o envelhecimento por irradiação gama, nas doses utilizadas no presente trabalho, teve pouca influência no desempenho balístico do material, mostrando que o comportamento mecânico do compósito pode ter sido influenciado pela textura do tecido.

Palavras-chave: Aramida; Policloropreno; Blindagem balística; Envelhecimento; Irradiação gama.

INFLUENCE OF AGING ON BALLISTIC PERFORMANCE OF AN ARAMID COMPOSITE

Abstract

The need for materials of high strength and high toughness for use in ballistic protection has led to the development of polymer matrix composites (PMCs) reinforced with fibers. However, polymeric materials when exposed to environmental agents may show changes that often modify their properties. In the present work, the ballistic performance of a laminate made of aramid fabric and polychloroprene (CR), artificially aged by gamma irradiation in a range of doses between 40 kGy and 200 kGy was studied. The material, before and after gamma irradiation, was characterized by physico-chemical (TGA, DSC and FTIR) and mechanical (tensile and adhesion) and subjected to ballistic test. The results showed that the gamma irradiation produces degradation of polyaramide, which presents chain scission. However, it was found that gamma irradiation aging at doses used in this study had small effect on the ballistic performance of the material, showing that the mechanical behavior of the composite may have been influenced by the fabric texture.

Key words: Aramid; Polychloroprene; Ballistic armor; Aging; Gamma irradiation.

¹ Contribuição técnica ao 68^o Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

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

³ Engenheiro Mecânico e Doutor em Ciências, Professor, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

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

1 INTRODUÇÃO

Os compósitos laminados produzidos com tecidos de fibras poliméricas de alto módulo e alta resistência têm se destacado como ótimos materiais de proteção balística, em face da alta resistência ao impacto na direção normal ao plano do laminado.⁽¹⁾ A fibra de poliamida, também conhecida como poliamida aromática, aramida ou pelos seus nomes comerciais, Kevlar[®] e Twaron[®] tem sido, dentre estas fibras, a mais utilizada em blindagens balísticas.

Os polímeros, todavia, quando expostos a agentes ambientais, envelhecem apresentando modificações macromoleculares, que produzem, comumente, degradação com redução nas suas propriedades tecnológicas. As poliamidas degradam, em especial, na presença de umidade e de radiações, o que pode alterar as suas propriedades e modificar o seu desempenho balístico.⁽¹⁾ Em consequência, a avaliação da influência do envelhecimento no comportamento mecânico e balístico destes materiais, após sua exposição a agentes ambientais, é importante para o emprego das poliamidas em blindagens balísticas.

O desempenho balístico das blindagens de aramida após sua exposição aos agentes ambientais não está perfeitamente conhecido, pois a quantidade de dados disponíveis na literatura é relativamente pequena, devido ao reduzido número de trabalhos nesta área e, também, a pouca divulgação de resultados pelos fabricantes. Assim, a realização de estudos para o desenvolvimento de técnicas de caracterização e de avaliação do comportamento destes materiais, em especial nas condições brasileiras, é importante para a predição do desempenho da blindagem balística ao longo da sua vida útil.

O poli(p-fenileno tereftalamida) (PPDT ou PPTA) ou poliamida aromática ou poliamida ou, simplesmente, aramida é um polímero orgânico sintético, de coloração amarelo ouro, que apresenta uma cadeia principal com, pelo menos, 85% dos grupamentos amida ligados diretamente a dois anéis aromáticos.

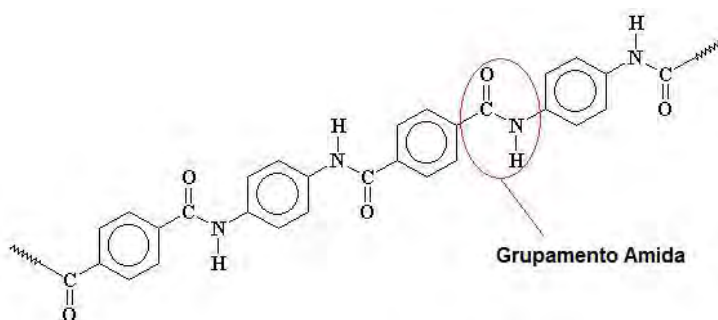


Figura 1. Cadeia macromolecular da poliamida.⁽²⁾

As poliamidas são divididas em dois tipos básicos: meta-aramidas, onde os grupos amida estão ligados ao anel aromático nas posições 1 e 3 e para-aramidas, onde as ligações ocorrem nas posições 1 e 4. Neste trabalho a fibra estudada foi do tipo para-aramida, citada, deste ponto em diante, simplesmente como aramida.

A aramida, que é altamente cristalina devido ao fácil empilhamento dos anéis aromáticos das cadeias adjacentes, se destaca pela elevada resistência à tração.

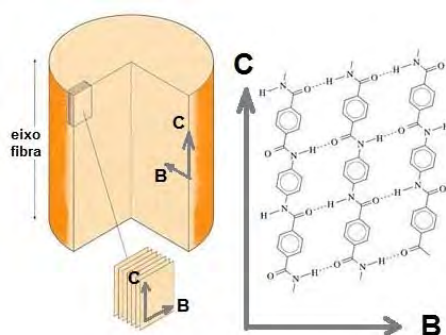


Figura 2. Ligações de hidrogênio entre as moléculas de poliamida.⁽³⁾

2 MATERIAIS MÉTODOS

2.1 Materiais

Neste trabalho foram estudados os efeitos da radiação gama em um compósito laminado de aramida (reforço) e policloropreno (matriz), empregado com blindagem balística veicular. Tal blindagem, comercializada com o nome Neoflex III-A Plus BLKN571, pela empresa BCA Têxtil (São José dos Campos, SP), se enquadra no nível III-A segundo a norma ABNT NBR 15000.⁽⁴⁾

O compósito laminado (blindagem) é composto por 8 camadas de tecido de aramida, revestidas, em ambas as faces, com uma película elastomérica de policloropreno (CR) e unidas por moldagem a quente.

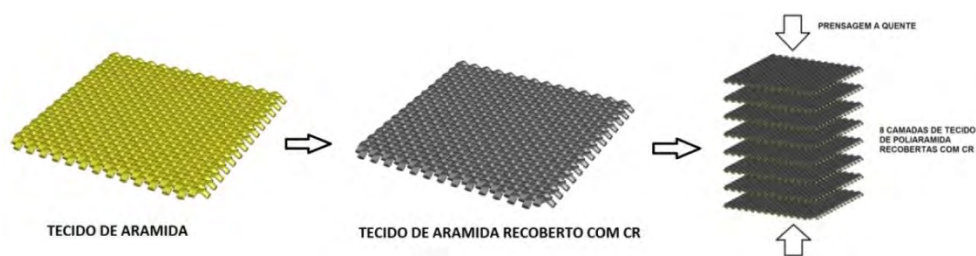


Figura 3. Desenho esquemático do processo de fabricação por prensagem a quente do laminado com 8 camadas de poliamida revestidas com policloropreno.

2.2 Irradiação Gama

A irradiação gama foi realizada ao ar, com uma taxa de dose de 1,6 kGy/h e as amostras receberam doses totais de radiação de 40, 80, 100, 160 e 200 kGy. Foram realizados, antes e após irradiação gama, ensaios físico-químicos (TGA, DSC, FTIR e peso molecular), mecânicos (tração da fibra e adesão) e balístico.

2.3 Análise Termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica (TGA) da fibra de poliamida sem revestimento de CR foi realizada em um equipamento Shimadzu modelo TGA-60. As amostras, pesando aproximadamente 5 mg, colocadas em cadinhos de alumínio, foram submetidas, sob ar, a um ciclo de aquecimento com a temperatura variando de 30°C até 700°C, na velocidade de 10°C/min. Foram determinadas: a perda de massa, a temperatura de início da perda de massa (*onset*) e a temperatura de máxima taxa de degradação, para cada condição das amostras.

2.4 Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)

A calorimetria diferencial de varredura da fibra de poliaramida sem revestimento de CR foi realizada em um equipamento Shimadzu modelo DSC-60. As amostras, com massa aproximada de 1,5 mg, colocadas em cadinhos de alumínio, foram submetidas, sob um fluxo de ar, a um ciclo de aquecimento de 30°C até 600°C, nas velocidades de 10°C/min (30°C a 400°C) e 5°C/min (400°C a 600°C). Foram determinadas as temperaturas de degradação da fibra de poliaramida.

2.5 Espectroscopia no Infravermelho (FTIR)

A espectroscopia no infravermelho (FTIR) da fibra de aramida foi realizada na região entre 4000-650 cm^{-1} , empregando-se a técnica de reflectância total atenuada (ATR). Os espectros em transmissão foram obtidos com resolução de 4 cm^{-1} e seis varreduras por ensaio.

Os espectros de transmissão FTIR foram transformados em absorção e suas linhas base ajustadas para um mesmo patamar. As alturas dos “picos”, visando uma análise qualitativa da degradação, foram normalizadas para o “pico” em 821 cm^{-1} , que corresponde à vibração fora do plano da ligação C-H (anel benzeno), que apresenta elevada intensidade e que permanece praticamente inalterado ao longo do processo de irradiação gama.^(5,6)

Para o acompanhamento da degradação produzida pela radiação gama foram calculadas as variações percentuais das alturas dos picos FTIR das principais ligações presentes no grupamento amida e de bandas atípicas a molécula de aramida: 3312 cm^{-1} – estiramento N-H; 1638 cm^{-1} – estiramento C=O; 1538/1513 cm^{-1} – interação da flexão N-H e estiramento C-N; 1305 cm^{-1} – estiramento C-N e 1744 cm^{-1} – estiramento C=O (atípico a aramida).

2.6 Peso Molecular

O material para a determinação do Peso Molecular Viscosimétrico Médio foi retirado de amostras do tecido de poliaramida sem revestimento de CR. A determinação da viscosidade intrínseca foi realizada em um viscosímetro Ubbelohde tipo 2B, segundo a norma ASTM D446⁽⁷⁾, na temperatura de 25°C, utilizando, na preparação das soluções, o ácido sulfúrico 96 % como solvente.⁽¹⁾

2.7 Ensaio de Adesão do Laminado

O ensaio de adesão do laminado foi realizado, à temperatura ambiente, segundo a norma ASTM D1876,⁽⁸⁾ na velocidade de deslocamento da agarra de 250 mm/min. Foram ensaiados 5 corpos de prova, com um comprimento útil de 250 mm, para cada condição, determinando-se, para cada um, o valor de resistência à delaminação e calculando-se um valor médio de resistência.

2.8 Ensaio de Tração da Fibra

O ensaio de tração da fibra de aramida foi realizado segundo a norma ASTM D7269,⁽⁹⁾ à temperatura ambiente, na velocidade de 2 mm/min. Para a confecção dos corpos de prova utilizados no ensaio de tração foram extraídas fibras do tecido, não irradiado e irradiado com raios gama, desmanchando-se conjuntos de urdume.

2.9 Teste Balístico

No ensaio balístico foram testadas duas placas-alvo com dimensões de 450 x 400 mm para cada uma das seguintes condições: como recebido, 40 kGy, 100 kGy e 200 kGy. Foram efetuados nove disparos por alvo, empregando-se munição 9 mm FMJ, com massa de 8,0 g e disparada de um provete localizado a 5 m do alvo, em um ângulo de incidência de 0°.

A avaliação do desempenho balístico do compósito laminado de aramida e policloropreno, para cada condição do material, foi realizada por meio de dois procedimentos, a saber:

- determinação do limite balístico (V_{50}) do material da blindagem de acordo com o previsto na norma MIL-STD-662F,⁽¹⁰⁾ considerando-o igual à média aritmética das velocidades de dez impactos: as cinco maiores velocidades que resultaram em penetração parcial (PP) e as cinco menores velocidades que resultaram em penetração completa (PC); e
- determinação, para cada condição do laminado, da energia por área delaminada dos impactos com penetração parcial.

3 RESULTADOS

3.1 Análise Termogravimétrica (TGA)

A Figura 4 apresenta uma superposição das curvas termogravimétricas por TGA da poliaramida, antes e após irradiação e a Tabela 1 apresenta os parâmetros obtidos na análise termogravimétrica.

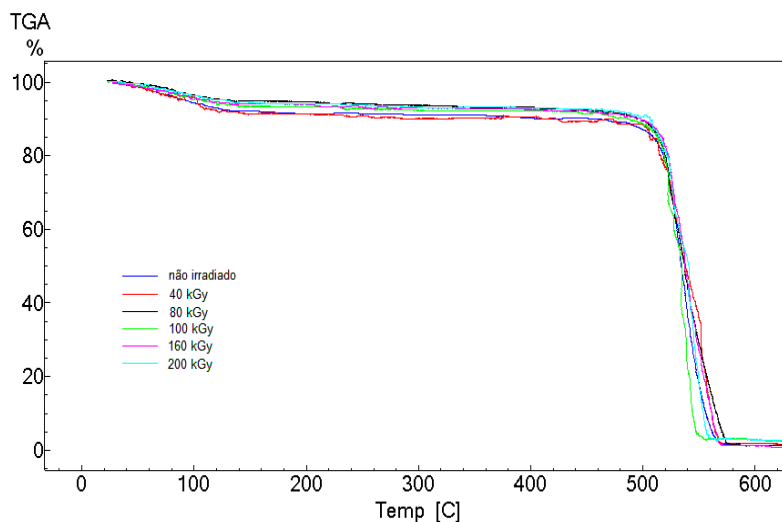


Figura 4. Superposição das curvas termogravimétricas por TGA da poliaramida, antes e após irradiação.

Verifica-se que as curvas termogravimétricas mostram aspectos bastante similares, não sendo observadas alterações sensíveis no comportamento térmico da fibra irradiada em relação a não irradiada; a irradiação gama, nas doses utilizadas, não produziu variações significativas na estabilidade térmica da fibra de aramida.

Observa-se, em todas as análises, a existência de dois pontos de inflexão, que indicam a ocorrência de dois estágios de degradação e, portanto, duas perdas de massa (Δm_1 e Δm_2) e duas temperaturas de início de degradação (T_{d1} e T_{d2}). A

curva termogravimétrica, entre 25 e 130°C, mostra uma pequena perda de massa (5% a 8%) que, a partir de 500°C, passa a decair rapidamente (onset), caracterizando o início da decomposição da fibra. Este comportamento pode ser creditado, no 1^o estágio, à liberação de produtos gasosos (água e dióxido de carbono) ($\Delta m_1 \approx 7\%$ e $T_{d1} \approx 100^\circ\text{C}$) e, no 2^o estágio ($\Delta m_2 \approx 90\%$ e $T_{d2} \approx 540^\circ\text{C}$), à formação de produtos de degradação resultantes da quebra homolítica das ligações da cadeia macromolecular da aramida (anel benzênico e ligações amida e NH).⁽¹¹⁾

Tabela 1. Parâmetros obtidos na análise termogravimétrica

Condição	Perda de massa (%)			Temperatura (°C)	
	Faixa de temperaturas (°C)		Total	Início perda de massa (onset) (T_0)	Máx. taxa de degradação (T_d)
	25-130 (Δm_1)	400-600 (Δm_2)			
Como recebido	7,6	88,8	98,6	513	532
40 kGy	8,1	88,6	98,2	507	531
80 kGy	5,2	91,9	99,0	508	524
100 kGy	6,1	89,3	97,2	510	538
160 kGy	5,6	91,4	98,6	514	537
200 kGy	5,2	90,1	97,2	501	527

3.2 Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)

A Figura 5 apresenta uma superposição das curvas calorimétricas por DSC da fibra de poliaramida, antes e após irradiação gama.

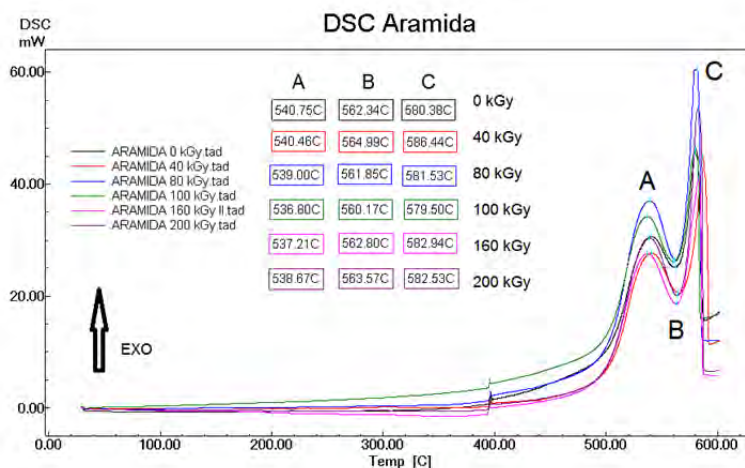


Figura 5. Superposição das curvas calorimétricas por DSC da fibra de poliaramida, antes e após irradiação gama.

Verifica-se que as duas exotermas apresentam diferentes intensidades, mas o formato e a posição das mesmas não são modificados significativamente pela irradiação gama, nem pela variação na dose de radiação empregada.

A primeira exoterma ocorre na região entre 480°C e 560°C com uma temperatura máxima média de, aproximadamente, 540°C (T_{d3}) e a segunda, entre 560°C e 580°C, com um “pico” máximo médio em, aproximadamente, 580°C (T_{d4}), respectivamente, pontos “A” e “C” da Figura 5.

A Tabela 2 apresenta as propriedades térmicas (entalpia e temperatura de degradação) da fibra de poliaramida, antes e após irradiação gama. O valor da entalpia de degradação foi determinado considerando a soma das áreas das duas exotermas.

Tabela 2. Propriedades térmicas por DSC da fibra de poliaramida, antes e após irradiação gama

Dose (kGy)	Exotermas de decomposição		
	Entalpia (kJ/g)	Temperatura (°C)	
	ΔH_d	T_{d3}	T_{d4}
0	-15,67	540,75	580,38
40	-16,86	540,46	586,44
80	-16,52	539,00	581,53
100	-16,69	536,80	578,50
160	-19,19	537,21	582,94
200	-21,59	538,67	582,53

A análise térmica, por TGA e DSC, do comportamento da fibra de poliaramida, antes e após irradiação gama, apresentou resultados concordantes. Verificou-se que a decomposição térmica da poliaramida é exotérmica e que a exposição à radiação gama produz uma pequena redução na estabilidade térmica da mesma cuja intensidade é influenciada pela dose empregada.

A primeira exoterma que ocorre na faixa de temperaturas entre, aproximadamente, 480 °C e 560 °C (região “A” da Figura 5) está associada à decomposição termo-oxidativa da aramida, enquanto que a segunda exoterma, na faixa de temperaturas entre cerca de 550 °C e 600 °C (região “C” da Figura 5) pode ser atribuída à combustão destes produtos pirolíticos, possivelmente benzenonitrila ⁽¹²⁾.

Observa-se, ainda, que os valores da entalpia de decomposição crescem com a taxa de radiação gama aplicada, demonstrando que o aumento da dose de radiação faz aumentar a quantidade de calor liberado na decomposição térmica. Tal comportamento se deve a maior taxa de oxigênio (oxidação) na cadeia, induzida pela radiação gama.⁽¹³⁾ Observa-se, ainda, que a ordem de grandeza da entalpia de decomposição calculada está abaixo dos valores encontrados na literatura, cerca de -35 kJ/g⁽¹⁾ e -22 kJ/g.⁽¹⁴⁾

3.3 Espectroscopia no Infravermelho (FTIR)

As transformações produzidas pela irradiação gama na poliaramida podem ser monitoradas comparando-se os espectros FTIR do material irradiado com os do não irradiado. As bandas: N-H estiramento \rightarrow 3312 cm^{-1} (amida A); C=O estiramento \rightarrow 1638 cm^{-1} (amida I); interações N-H flexão / C-N estiramento \rightarrow 1538 cm^{-1} e 1513 cm^{-1} (amida II) e C-N estiramento \rightarrow 1305 cm^{-1} (amida III) são características da aramida, podendo ser consideradas como padrões internos do material.⁽¹⁵⁾

A comparação dos espectros FTIR normalizados (Figura 8), mostra que a intensidade dos principais “picos” varia com o aumento da dose de radiação, embora não mostrem diferenças significativas no seu posicionamento.

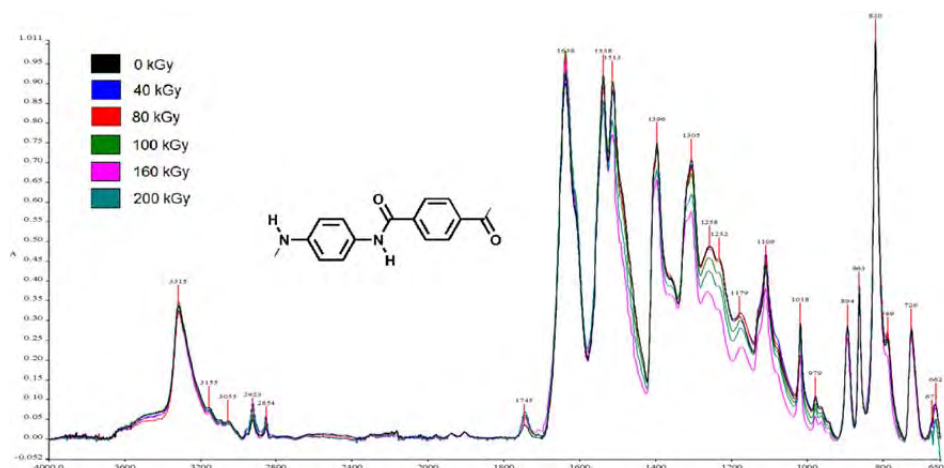


Figura 6. Superposição dos espectros de FTIR em absorbância, normalizados pelo “pico” em 821 cm^{-1} , da fibra de poliaramida, antes e após irradiação.

As intensidades dos “picos” das bandas características da fibra de poliaramida, normalizados pela banda de 821 cm^{-1} , estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Intensidade dos “picos” das bandas características da fibra de poliaramida normalizados pela banda 821 cm^{-1} , antes e após irradiação

Bandas (cm^{-1})		Intensidade normalizada				
		3312	1638	1538/1513	1305	1744
Amida		A	I	II	III	-
Dose (kGy)	0	0,2992	0,9134	0,9076	0,6960	0,0373
	40	0,2908	0,8892	0,8902	0,6806	0,0642
	80	0,2905	0,9226	0,8736	0,6764	0,0581
	100	0,3114	0,9732	0,8918	0,6633	0,0558
	160	0,3052	0,9675	0,8373	0,5782	0,0543
	200	0,3045	0,9298	0,8504	0,6167	0,0664

Verifica-se que:^(13,16)

- as intensidades normalizadas dos “picos” das amidas A e I variaram de maneira semelhante, apresentando redução nas menores doses (40 e 80 kGy) e aumento nas doses mais elevadas (100, 160 e 200 kGy). Este comportamento indica que grupos funcionais diferentes do grupamento amida, possivelmente grupamentos aldeídos e/ou carboxilas, são produzidos pela cisão da cadeia principal;
- as intensidades normalizadas dos “picos” das amidas II e III são reduzidas pela irradiação, indicando a cisão das ligações C-N; e
- a intensidade normalizada do “pico” em 1744 cm^{-1} aumenta com a irradiação sugerindo a oxidação da poliaramida, pela transformação da carbonila (grupo C=O) em grupos aldeídos e ésteres.

Estas observações sugerem que a irradiação gama produz, na fibra de aramida, cisão da cadeia principal e degradação oxidativa.

3.4 Peso Molecular

A Tabela 4 apresenta a variação da viscosidade intrínseca e do peso molecular viscosimétrico médio para a poliaramida, antes e após irradiação.

Tabela 4. Viscosidade intrínseca e peso molecular viscosimétrico médio para a poliaramida, antes e após irradiação

Condição	Viscosidade intrínseca (dl/g)	Peso molecular viscosimétrico médio (g/mol)
Como recebido (0 kGy)	5,7779	28675
Irradiado com 40 kGy	5,6655	28163
Irradiado com 80 kGy	5,4954	27386
Irradiado com 100 kGy	4,9806	25023
Irradiado com 160 kGy	5,2341	26189
Irradiado com 200 kGy	5,0890	25522

Observa-se que a poliaramida apresentou, com o aumento da dose de radiação gama, uma redução no seu peso molecular viscosimétrico médio. Esta redução, que está associada à cisão da cadeia principal, ocorre, predominantemente, nas moléculas da superfície da fibra.⁽¹⁷⁾

3.5 Ensaio de Adesão do Laminado

A Tabela 5 apresenta o valor médio e o desvio padrão da força de adesão para cada uma das condições de degradação do compósito.

Tabela 5. Resultados do ensaio de adesão do compósito, antes e após irradiação

Condição (kGy)	Força de adesão (N)	Desvio padrão
Não irradiado	26,05	1,78
40	20,15	5,89
100	22,69	2,63
200	22,86	5,18

Verifica-se que o material irradiado apresenta uma força de adesão menor e um maior desvio padrão, comparado com o material não irradiado. Assim, pode-se sugerir que a exposição do compósito à radiação gama produziu, aparentemente, uma redução na capacidade de adesão do policloropreno, pois a força de adesão média do material irradiado, em relação a do não irradiado, é, aproximadamente, 16% menor.

3.6 Ensaio de Tração da Fibra

Os resultados para a tensão de ruptura e alongamento nas fibras de poliaramida estão mostrados na Tabela 6.

Tabela 6. Resultados do ensaio de tração da fibra de aramida

Condição (kGy)	Tensão máxima (mN/tex)	Alongamento na ruptura (%)	Módulo (mN/tex)
0	1702	3,13	53073
40	1578	3,07	50169
80	1668	3,17	51195
100	1710	3,20	51619
160	1449	2,71	53150
200	1678	3,19	51422

Verifica-se que os resultados mostraram uma variação não uniforme nos seus valores, destacando-se o da fibra irradiada com 160 kGy que apresentou queda de

≈15% na tensão de ruptura em relação a fibra não irradiada. No entanto, pode-se considerar que a radiação gama pouco influenciou o comportamento em tração da fibra, pois o módulo apresentou um valor relativamente uniforme, com variações entre as amostras dentro do desvio padrão.

3.7 Teste Balístico

A Tabela 7 apresenta os resultados do limite balístico (V_{50}) e a faixa de dispersão ($V_{90} - V_{10}$) entre 10% e 90% de probabilidade de PC, para cada uma dos subgrupos de avaliação.

Tabela 7. Resultado do ensaio balístico

Dose de radiação gama (kGy)	V_{50} (m/s)	$V_{90} - V_{10}$ (m/s)	Nr. de disparos
0	364	5	20
40	358	15	18
100	370	6	18
200	354	11	18

Observa-se que o limite balístico (V_{50}) apresenta pequena variação com a irradiação gama, mostrando, com o aumento da dose, um comportamento oscilatório, a V_{50} diminui para as doses de 40 kGy e 200 kGy e aumenta para a de 100 kGy. Este comportamento apresentado pelo V_{50} está de acordo com estudos executados nesta área.^(18,19)

A Tabela mostra, para cada condição do laminado, o respectivo limite balístico e a relação energia de impacto por área delaminada (E/A).

Tabela 8. Valores da relação energia de impacto por área delaminada das blindagens avaliadas

Dose (kGy)	Limite balístico V_{50} (m/s)	Energia de impacto / Área delaminada (J/cm^2)
0	363,70	3,1502
40	357,82	2,8510
100	370,03	3,4434
200	354,57	2,7612

A Figura 7 mostra que a variação do desempenho balístico das blindagens avaliadas tem como principal fator a energia de delaminação; as blindagens com maiores relações energia por unidade de área delaminada tem limites balísticos maiores.

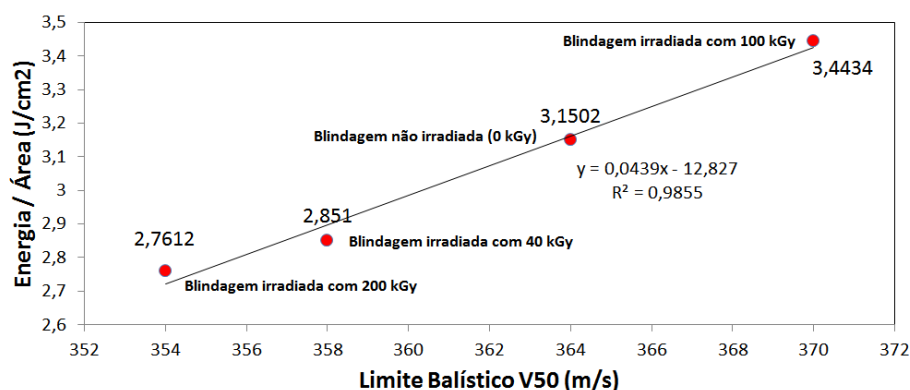


Figura 7. Variação do valor médio da relação energia de impacto / área delaminada com o limite balístico para cada condição da blindagem de aramida com policloropreno, após o ensaio balístico.

Os resultados mostram, também, que, em média, para disparos com mesma energia, as amostras de 40 kGy e 200 kGy delaminam mais do que as amostras do grupo 0 kGy e 100 kGy. Assim, pose-se afirmar que o laminado de poliaramida com cloropreno “como recebido” (não irradiado) e o irradiado com 100 kGy absorvem mais energia por unidade de área delaminada do que os irradiados com 40 kGy e 100 kGy.

4 CONCLUSÃO

A análise dos resultados experimentais obtidos neste trabalho, associada às informações presentes na literatura permite inferir que a exposição da fibra de poliaramida à radiação gama nas doses de 40, 80, 100, 160 e 200 kGy:

- reduz gradualmente o seu peso molecular, devido, preferencialmente, à cisão no grupamento amida. A cisão das cadeias poliméricas se dá, provavelmente, na região da superfície da fibra, através da oxidação do grupamento amida;
- provoca a cisão das cadeias poliméricas, provavelmente pela hidrólise e/o oxidação da fibra, com a formação de grupamentos aldeídos e/ou carboxilas nas novas terminações;
- não altera o comportamento térmico da fibra, permanecendo a temperatura de degradação inalterada;
- eleva a variação de entalpia na degradação, com base no aumento da taxa de oxigênio na molécula;
- não exerce relevante influencia no comportamento em tração da fibra, tendo em vista que as modificações descritas acima, provavelmente, ocorrem na superfície da fibra, permanecendo seu núcleo inalterado;
- pode-se inferir que a exposição do laminado de poliaramida com policloropreno à radiação gama nas doses de 40, 80, 100, 160 e 200 kGy:
- influencia a adesão entre as camadas, devido, provavelmente, a degradação do policloropreno;
- influencia o limite balístico através da variação da capacidade de absorção da energia de impacto através da delaminação;
- o limite balístico tem relação direta com a capacidade de absorção da energia de impacto pela delaminação. As blindagens que apresentaram maior eficiência (energia/cm²) na delaminação foram as que obtiveram os maiores limites balísticos.

REFERÊNCIAS

- 1 YANG, H.H.. Kevlar Aramid Fiber. Baffins Lane, Chichester West Sussex, Inglaterra: John Wiley & Sons, 1993.
- 2 HOLMES, G.A.; Rice, K.; Snyder, C.R. Ballistic fibers: A review of the thermal, ultraviolet and hydrolytic stability of the benzoxazole ring structure. Journal of Materials Science, v. 41, p. 4105-4116, 2006.
- 3 DUPONT. Manual Técnico Kevlar[®] Fibra de Aramida. Dupont Advanced Fibers Systems, São Paulo, 2010.
- 4 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Norma ABNT NBR 15000 – Blindagens para impactos balísticos - Classificação e critérios de avaliação. ABNT, Rio de Janeiro, RJ, 2005.
- 5 HILL, D.J.T.; WHITTAKER, A.K. Radiation Chemistry of Polymers - Encyclopedia of Polymer Science and Technology. Editora John Wiley & Sons, 2005.

- 6 DEROMBISE, G.; SCHOORS, L.V.V.; DAVIES, P. Degradation of Technora aramid fibres in alkaline and neutral environments. *Polymer Degradation and Stability*, v. 94, n. 10, p. 1615-1620, 2009
- 7 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Norma ASTM D446–07, Standard Specifications and Operating Instructions for Glass Capillary Kinematic Viscometers. Philadelphia, PA, 2007.
- 8 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Norma ASTM D1876–08, Peel Resistance of Adhesives. Standard Test Methods for. Philadelphia, PA, 2008.
- 9 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Norma ASTM D7269–08, Tensile Testing of Arami Yarns. Standard Test Methods for. Philadelphia, PA, 2008.
- 10 U. S. DEPARTMENT OF DEFENSE. MIL-STD-662F - V₅₀ Ballistic Test for Armor. Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América, 1997.
- 11 BROWN, J.R. e POWER, A.J. Thermal degradation of aramid; part I – pyrolysis / gas chromatography / massspectrometry of poly(1,3 phenyleneisophthalamide) and poly(1,4 phenyleneterephthalamide). *Polymer Degradation and Stability*, v. 4, p. 379-392, 1982.
- 12 CAI, G.M. e YU, W.D. Study on the thermal degradation of high performance fibers by TG/FTIR and Py-GC/MS. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 104, n. 2, p. 757-763, 2011 (DOI 10.1007/s10973-010-1211-0).
- 13 ZHANG Y.H.; Huang, Y.D.; Liu, L.; Cai, K.L. Effects of γ -ray radiation grafting on aramid fibers and its composites. *Applied Surface Science*, v. 254, p. 3153 – 3161, 2008.
- 14 BOURBIGOT, S.; FLAMBARD, X. e DUQUESNE, S. Thermal degradation of poly(p-phenylenebenzobisoxazole) and poly(p-phenylenediamine terephthalamide) fibres. *Polymer International*, v. 50, p. 157-164, 2001.
- 15 FORSTER, A.L; PINTUS, P.; MESSIN, G.H.R.; RILEY, M.A.; PETIT, S.; ROSSITER, W.; CHIN, J. e RICE, K.D. Hydrolytic stability of polybenzobisoxazole and polyterephthalamide body armor. *Polymer Degradation and Stability*. v. 96, p. 247-254, 2011.
- 16 ZHANG, Y.H.; J. ZHANG, J.; CHEN J.; HAO, X.; WANG, S.; FENG, X.; GUO, Y. Effects of solar UV irradiation on the tensile properties and structure of PPTA fiber. *Polymer Degradation and Stability*, v. 91, p. 2761 – 2767, 2006.
- 17 ZHANG Y.H.; Huang, Y.D.; Liu, L.; WU, L. Surface modification of aramid fibers with γ -ray radiation for improving interfacial bonding strength with epoxy resin. *Journal of Applied Polymer Science*, v.106, p. 2251–2262, 2007.
- 18 GRAVES, J.H.; KOLEV, H. Joint technical coordinating group on aircraft survivability interlaboratory ballistic test program. Army Research Laboratory, 1995.
- 19 SINGLETARY, J.; STEINRUCK, T. e FITZGERALD, P. Effects of boundary conditions on V50 and zone of mixed results of fabric armor targets. 23^o International Symposium on Ballistics. Tarragona, Espanha, 2007.