

# INFLUÊNCIA DA RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS LAMINADOS DE POLIETILENO DE BAIXA DENSIDADE (PEBD) UNIDOS POR RESINA A BASE ETILCIANOACRILATO E POR SILICONE\*

Karollyne Gomes de Castro Monsoreos<sup>1</sup>

Anderson Oliveira da Silva<sup>2</sup>

Ricardo Pondé Weber<sup>3</sup>

André Ben-Hur da Silva Figueiredo<sup>4</sup>

## Resumo

Os materiais poliméricos são sensíveis a radiação ultravioleta, acarretando mudanças em suas propriedades. Sob esta perspectiva, o presente estudo expôs o polietileno de baixa densidade (PEBD) a radiação ultravioleta por 150 e 300 horas. A avaliação físico-química e a caracterização mecânica foram realizadas para verificar as mudanças macromoleculares produzidas por tal radiação e confirmadas por exame visual. Diante dos resultados, confirmou-se a ocorrência de degradação, através da presença de ruptura de cadeias, além da produção de reticulação, e um sutil decréscimo da cristalinidade. O ensaio de tração confirmou a fragilização produzida pela radiação. O desempenho balístico das placas fixadas por adesivo a base de etilcianoacrilato produziram delaminação, ao contrário do observado nas placas fixadas por silicone.

**Palavras-chave:** Polietileno de baixa densidade; Degradação; Radiação ultravioleta; Comportamento mecânico.

## INFLUENCE OF ULTRAVIOLET RADIATION IN THE MECHANICAL BEHAVIOR OF LAMINATED COMPOUNDS OF LOW-DENSITY POLYETHYLENE (LDPE) CONTAINED BY RESIN BASED ON ETHYLIANO ACRYLATE AND SILICONE

## Abstract

The polymeric materials are sensitive to ultraviolet radiation, causing changes in their properties. From this perspective, the present study exposed low density polyethylene (LDPE) to ultraviolet radiation for 150 and 300 hours. Physical-chemical evaluation and mechanical characterization were performed to verify the macromolecular changes produced by such radiation and confirmed by visual examination. In view of the results, the occurrence of degradation, through the presence of chain rupture, besides the production of crosslinking, and a subtle decrease of the crystallinity were confirmed. The tensile test confirmed the embrittlement produced by the radiation. The ballistic performance of the ethylene acrylate-based adhesive plates produced delamination, unlike that observed in the silicone-fixed plates.

**Keywords:** Low density polyethylene; Degradation; Ultraviolet radiation; Mechanical behavior.

<sup>1</sup> Tecnóloga de Polímeros, Mestre em Ciência dos Materiais, Doutoranda em Ciência dos Materiais, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro e Brasil.

<sup>2</sup> Licenciado em Química, Mestrando em Ciência dos Materiais, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro e Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Mecânico, Doutor em Ciência dos Materiais, Professor/Pesquisador, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro e Brasil.

<sup>4</sup> Bacharel em Física, Doutor em Ciência dos Materiais, Professor/Pesquisador, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro e Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas o uso de materiais poliméricos, como material de engenharia, tem aumentado substancialmente, com o objetivo de substituir os materiais mais tradicionais. Para representar tal aumento, podemos exemplificar com o consumo de poliolefinas no mundo, que em 1950 era de aproximadamente 1,5 milhões de toneladas, subindo para 288 milhões de toneladas em 2012, sendo o Brasil responsável pela produção de apenas 2% deste total [1].

Dentre as poliolefinas mais consumidas na indústria de transformação de polímeros está o polietileno, devido as suas interessantes propriedades tais como: baixo custo de produção, boa resistência química, facilidade de processabilidade e atóxicade [2]. O aperfeiçoamento das propriedades do polietileno com o objetivo de ampliar sua aplicação a campos de atuação diversificados, já vem sendo realizado nos últimos anos. Entretanto os materiais poliméricos podem mudar suas propriedades quando expostos a agentes ambientais, devido a sua degradação, e por isso, avaliar as mudanças produzidas pela radiação ultravioleta (UV) é fundamental, para que outras aplicações possam ser introduzidas, de maneira que se alcance o desempenho mecânico desejado ou que a degradação (mudança de propriedades) seja controlada durante o tempo de vida útil deste material.

O Polietileno de baixa densidade (PEBD) é aplicado na indústria de embalagens, na indústria de produtos farmacêuticos e hospitalares, na indústria de construção civil (revestimento de fios e cabos, mangueiras e tubo), entre outros, necessitando desta forma de propriedades mecânicas muito específicas [1] [3].

Os cianoacrilatos compõem a classe mais importante de adesivos instantâneos, atendendo desde aplicações automotivas, à aplicações medicinais mesmo apresentando limitações, como elevada rigidez e estabilidade térmica relativamente baixa [4] [5] [6] [7].

Já o adesivo a base de silicone apresenta uma boa resistência ao calor e inércia química. Fazendo com que este seja aplicado em projetos e indústrias onde se exige materiais elatoméricos que não sejam afetados por agentes ambientais, tais como a indústria biomédica, odontológica, a de eletrônicos, a de construção civil, entre outras [8] [9] [10] [11] [12] [13].

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é avaliar a influência da radiação ultravioleta nas propriedades físico-químicas e mecânicas do PEBD, antes e após a exposição, além de estimar o desempenho balístico de placas de PEBD fixadas com adesivo à base de etilcianoacrilato e adesivo de silicone.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho teve como objetivo estudar e comparar compósitos laminados produzidos por duas placas de PEBD, de seis (6) mm de espessura cada, unidas por adesivo de silicone e por adesivo de etilcianoacrilato. A produção dos compósitos foi realizada da seguinte maneira:

1. Doze (12) placas de PEBD, de 6 mm de espessura, foram usinadas nas dimensões de 10x10 cm.

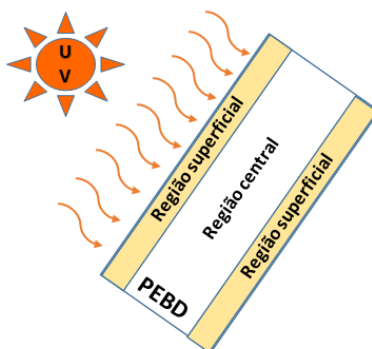
2. Estas placas foram subdivididas em 3 grupos de avaliação. Cada grupo formado por quatro placas foi exposto a radiação ultravioleta conforme a Tabela 1.

**Tabela 1.** Grupos de Avaliação e tempo de exposição.

<b>Grupo de Avaliação</b>	<b>Tempo de Radiação UV/Condição</b>
PE	Polietileno “como recebido” (não irradiado)
PE 150	Polietileno irradiado 150 horas
PE 300	Polietileno irradiado 300 horas

A exposição à radiação ultravioleta foi realizada em temperatura ambiente, ao ar, segundo a norma ASTM G154, utilizando uma câmara da marca Comexim modelo C-UV – Sistema acelerado de envelhecimento para não metálicos – Ultravioleta “B”, com controle automático da temperatura. Cada face das amostras foi exposta à radiação UV, sem simulação de chuva e/ou neblina, com lâmpadas fluorescentes, marca comercial Phillips FS-40 com intensidade de 40 W, na faixa de 290 nm ~ 315 nm.

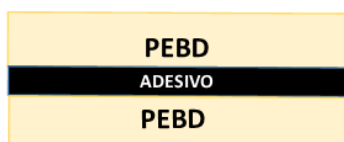
A Figura 1 apresenta uma representação esquemática da exposição das placas a radiação ultravioleta.



**Figura 1:** Representação esquemática da exposição à radiação UV.

3. Cada grupo de avaliação obteve dois compósitos, sendo um unido por adesivo silicone e outro unido por adesivo de etilcianoacrilato, totalizando seis compósitos a serem estudados.

A Figura 2 apresenta uma representação esquemática dos compósitos produzidos para este estudo.



**Figura 2:** Representação da fixação das placas para o ensaio balístico.

A caracterização físico-química, antes e após a radiação ultravioleta, foi realizada nas placas antes da produção dos compósitos, através do teor de gel, calorimetria diferencial de varredura (DSC) e espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier.

Para avaliação da reticulação do PEBD, o teor de gel foi obtido após solubilização dos componentes não reticulados da amostra em um extrator tipo Soxhlet, de acordo com a norma ASTM D2765, utilizando o xileno grau PA como solvente, por 12 horas sob refluxo (138 - 141 °C), na vazão de 40 gotas por minuto. A secagem do gel insolúvel foi feita em estufa à temperatura de 130°C durante 12 horas. A massa inicial das amostras variou de 0,5 e 0,7g.

O teor de gel foi calculado através da equação 1.

$$\text{Teor de gel} = \frac{W_s}{W_i} * 100 \quad (1)$$

Onde,  $W_s$  é a massa da amostra não solúvel, após secagem, em gramas; e  $W_i$  é a massa inicial da amostra (antes da extração) em gramas;

Para avaliação das possíveis modificações macromoleculares ocorridas devido à radiação ultravioleta, foi calculado o índice de oxidação utilizando-se a espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier. O índice de oxidação (IO) foi calculado através da equação 2.

$$IO = \frac{A_{1650-1850cm^{-1}}}{A_{1460-1470cm^{-1}}} \quad (2)$$

Onde se adota a razão entre a área da banda do grupamento da carbonila em 1650-1850  $cm^{-1}$  e a área da banda de referência, segundo o estudo de HADAD (2005) [17], em 1463  $cm^{-1}$  (referente deformação angular dos grupos  $CH_2$ ).

A espectroscopia no infravermelho foi obtida na região entre 4000-600  $cm^{-1}$ , com resolução de 4,0  $cm^{-1}$  e, com o mínimo de 64 varreduras por ensaio para obter uma boa razão sinal/ruído. A análise foi realizada sob a superfície exposta a radiação de cada grupo de avaliação, utilizando um espectrômetro Thermo Scientific Smart ITR is50 FT-IR, modelo Nicolet, com controlador de temperatura para FTIR médio.

Para a avaliação do grau de cristalinidade do PEBD, antes e após a radiação ultravioleta, foi utilizado o ensaio de calorimetria diferencial de varredura (DSC). Este ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM D3417, em um equipamento da marca NETZSCH, modelo DSC 404 F1 Pegasus, calibrado com índio e acoplado a um sistema computadorizado de análise. As amostras foram retiradas de cada grupo de avaliação da camada superficial e central, com peso variando entre 0,6 e 0,7 g, que foram aquecidas e resfriadas na taxa de 10°C/min. em uma faixa de temperatura que variou de 30°C à 200°C, sob fluxo de 50 ml/min de nitrogênio. Para eliminar a influência da história térmica do polímero foram realizadas duas varreduras. O grau de cristalinidade ( $X_c$ ) de cada grupo foi determinado em função do calor de fusão total, considerando para o polietileno 100% cristalino o calor de fusão igual a 293 J/g.

A caracterização mecânica do PEBD foi realizada através do ensaio de tração. Este ensaio foi realizado a temperatura ambiente, em uma máquina de ensaios universal marca Instron, modelo 5969. Os corpos de prova utilizados foram do tipo I e a velocidade do ensaio foi de 50 mm/min, segundo a norma ASTM D638-14.

A avaliação do comportamento balístico, antes e após a radiação ultravioleta, foi realizada em temperatura ambiente, utilizando um provete de ar comprimido da marca Gunpower modelo SSS, com dois cilindros comunicantes, um com capacidade de 0,5 L e o outro de 6 L, com pressão estimada em 185 bar e com projétil de chumbo calibre 22 de 3,3g. Para determinação da velocidade de boca e a energia em cada disparo, foi utilizado um cronógrafo balístico da marca Air Chrony modelo MK3, com precisão de 0,15 m/s. A Figura 3 apresenta uma fotografia do equipamento utilizado.



**Figura 3:** Equipamento de impacto.

Os compósitos laminados foram ensaiados utilizando um disparo para cada grupo de avaliação e tipo de adesivo. As Figura 4 e 5 apresenta uma vista frontal e lateral dos compósitos PEBD/silicone ensaiados.



**Figura 4:** Forma de fixação das placas com adesivos.



**Figura 5:** Vista lateral da fixação das placas.

Após o ensaio balístico, foi realizada uma inspeção visual nos compósitos e na região do impacto com o objetivo de avaliar o mecanismo de fratura produzido em cada grupo e adesivo.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Teor de gel

A Tabela 2 apresenta o grau de reticulação apresentado no PEBD, antes e após irradiação ultravioleta.

**Tabela 2:** Grau de reticulação do PE, antes e após a irradiação.

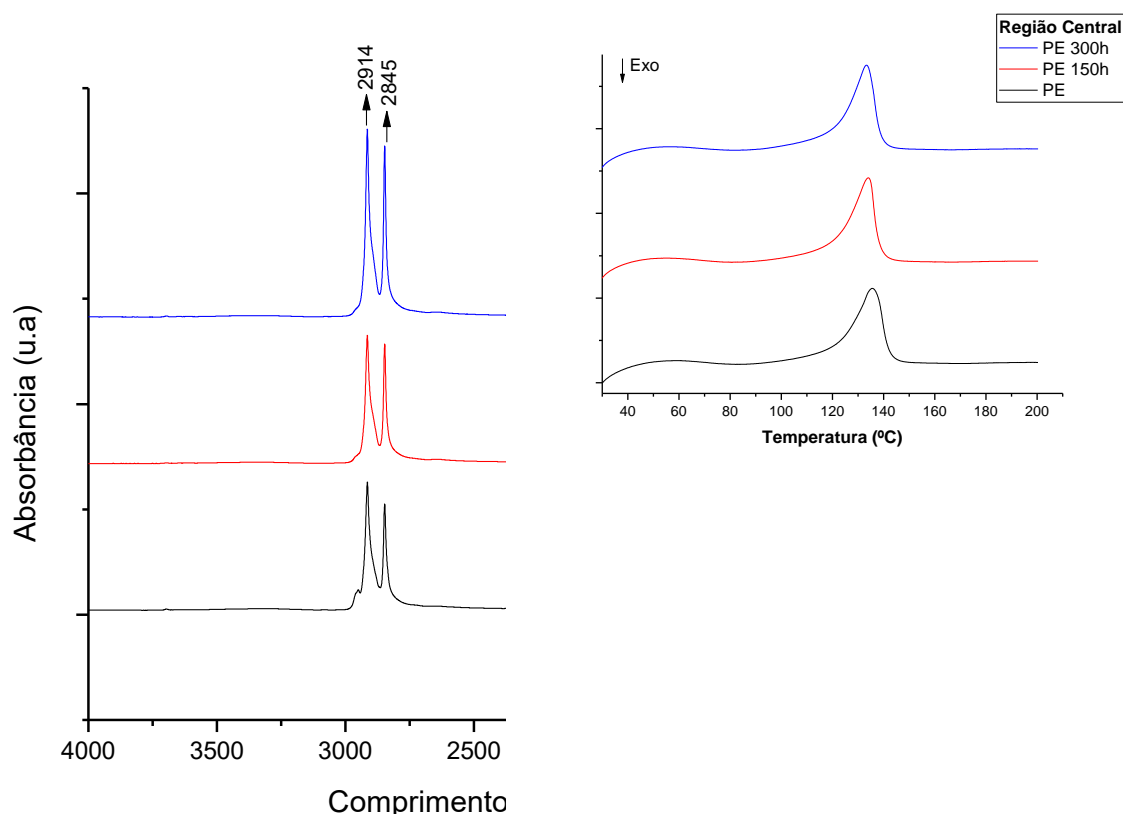
Grupo de Avaliação	Teor de Gel (%)
PE	14,67 ± 14,67
PE150	25,37 ± 12,87
PE300	56,73 ± 24,03

Observa-se um aumento no grau de reticulação do PEBD quando exposto a radiação ultravioleta. Esta reticulação é maior quanto maior o tempo de exposição deste material, sendo de 73% de aumento para o PEBD exposto a 150 horas e 287% para 300 horas, quando comparado ao material “como recebido”. Este aumento no grau de reticulação produz um material mais frágil [14].



### 3.2 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier

A Figura 6 apresenta os espectros obtidos por espectroscopia no infravermelho das amostras, antes e após a radiação ultravioleta. Observa-se bandas de absorção na região de  $3000\text{--}2800\text{ cm}^{-1}$  correspondentes a deformação axial do grupo C–H, bem como bandas que caracterizam a deformação angular do grupo CH<sub>2</sub> em  $1470$  e  $1460\text{ cm}^{-1}$ . O intervalo de bandas entre  $1000\text{--}630\text{ cm}^{-1}$  característicos da deformação angular do grupo C–H também se apresenta em  $730$  e  $718\text{ cm}^{-1}$  [15].

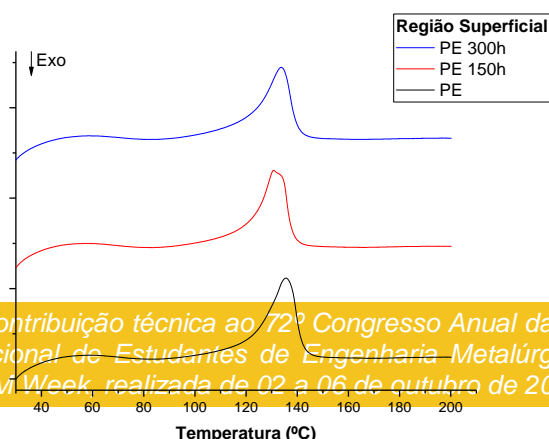


**Figura 6:** Espectros FTIR, em absorbância, dos grupos de avaliação na região superficial.

Porém não foi observada a banda característica do grupamento da carbonila em  $1720\text{ cm}^{-1}$  sugerindo que as mudanças no interior das amostras não foram apreciáveis nos espectros dos materiais irradiados, impossibilitando a obtenção do índice de oxidação. Além disso, observa-se a dissolução da banda em  $1375\text{ cm}^{-1}$  correspondente a deformação angular do grupo CH<sub>3</sub>, indicando uma possível cisão das cadeias [14] [16].

### 3.3 Calorimetria diferencial de varredura

As



Figuras 7 e 8 apresentam as curvas calorimétricas da região central e superficial das amostras.

**Figura 7:** Resultados de DSC da região superficial das placas.**Figura 8:** Resultados de DSC da região central das placas.

As Tabelas 3 e 4 apresentam as temperaturas de início de fusão e as cristalinidades calculadas pela relação entre as entalpias de fusão de cada grupo de avaliação na superfície e na região central das placas, antes e após a radiação ultravioleta, com relação a entalpia de fusão para o PEBD 100% cristalino.

**Tabela 3:** Resultados da análise térmica da região superficial das placas.

Grupo de Avaliação Superfície	T <sub>m</sub> (°C)	Cristalinidade (%)
PE	135,5	56,99
PE 150UV	130,7	51,22
PE 300UV	133,7	52,85

Observa-se que a temperatura de fusão cristalina da região superficial das placas apresenta uma pequena redução quando comparado ao material “como recebido”, sendo de 3,5% para o PE irradiado por 150 horas e 1,3% para o PEBD irradiado por 300 horas, devido provavelmente as possíveis cisões moleculares.

Observa-se também que ocorreu um decréscimo na cristalinidade de 10% para o PEBD irradiado por 150 horas e 7,3% para 300 horas [18]. Este decréscimo na cristalinidade, apesar de baixo e de não ser o esperado, representa uma tendência do material, que ao diminuir a cristalinidade deve mudar sua propriedade mecânica, possivelmente diminuindo a tenacidade devido reticulação [14] [18].

**Tabela 4:** Resultados da análise térmica da região central das placas.

Grupo de Avaliação Centro	T <sub>m</sub> (°C)	Cristalinidade (%)
PE	135,5	56,99
PE 150UV	134,1	60,69
PE 300UV	133,3	55,85

Observa-se pela Tabela 4 que a região central da placa não apresentou mudança significativa, tanto na temperatura de fusão como na cristalinidade, indicando que a degradação ocorreu apenas na região superficial da placa, como esperado.

### 3.4 Ensaio de tração no PEBD.

A tabela 5 apresenta os valores médios obtidos no ensaio de tração do PEBD antes e após irradiação ultravioleta. Foram ensaiados três (3) corpos de prova para cada grupo de avaliação

**Tabela 5:** Propriedades determinadas no ensaio de tração do PEBD, para cada grupo de avaliação.

Grupo de Avaliação	Módulo de elasticidade (Mpa)	Resistência a tração (Mpa)	Alongamento na ruptura (%)
PE	762,85 ± 22,04	27,16 ± 0,34	197,5 ± 6,97
PE 150UV	789,31 ± 6,28	27,86 ± 0,24	51,44 ± 1,09
PE 300UV	844,83 ± 8,48	28,4 ± 0,62	40,58 ± 6,94

Observa-se um pequeno aumento na resistência a tração de cerca de 5% do PEBD irradiado por 300 horas, porém uma acentuada redução de 74% e 79,4% no alongamento na ruptura, para o PEBD irradiado a 150 e a 300 horas, respectivamente, indicando uma fragilização do material irradiado [14]. Observa-se também um aumento considerável de 11% do módulo de elasticidade do material após irradiação ultravioleta, indicando uma maior rigidez deste material.

### 3.5 Ensaio balístico

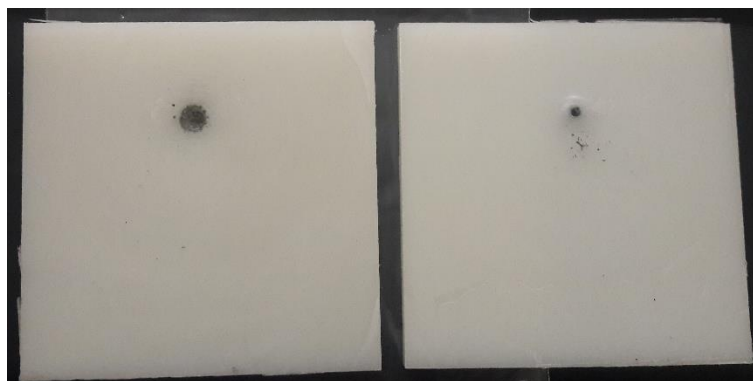
A Tabela 6 apresenta os resultados do ensaio balístico para cada compósito e grupo de avaliação.

**Tabela 6:** Dados do ensaio de impacto.

Alvo	Velocidade (m/s)	Energia (J)	Desempenho
PE - Etilcianoacrilato	227,72	85,56	Perfurou
PE 150UV - Etilcianoacrilato	224,21	82,94	Perfurou
PE 300UV - Etilcianoacrilato	228,46	86,12	Perfurou
PE – Silicone	228,46	86,12	Perfurou
PE 150UV – Silicone	231,43	88,37	Perfurou
PE 300UV – Silicone	228,73	86,32	Perfurou
<b>Média</b>	228,17 ± 2,12	85,90 ± 1,59	-

A avaliação dos danos produzidos e do desempenho de cada adesivo foram realizadas através de exame visual. Os compósitos PEBD/etilcianoacrilato apresentaram delaminação completa (separação completa das placas de PEBD) em todas as condições, diferentemente dos compósitos PEBD/silicone que permaneceram unidos após o impacto balístico, não apresentando delaminação aparente (figuras 9 e 10), o que indica uma fraca adesão do etilcianoacrilato comparado ao silicone. Este comportamento deve estar associado ao fato do adesivo de etilcianoacrilato ser frágil quando comparado ao silicone (material elastomérico), o que corrobora para a delaminação completa. Este comportamento induz uma diminuição da resistência balística deste compósito. As Figuras 11 e 12 apresentam a vista lateral dos compósitos PEBD/silicone irradiados por 150 e 300 horas.

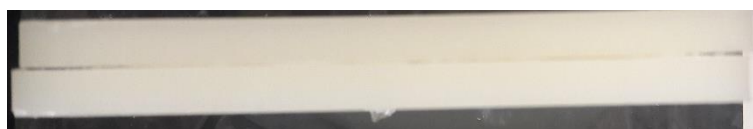




**Figura 9:** Fotografia da vista lateral superior da placa de PEBD/silicone irradiada por 150 horas.



**Figura 10:** Fotografia da vista lateral superior da placa de PEBD/silicone irradiada por 300 horas.



**Figura 11:** Fotografia da vista lateral superior da placa de PEBD/silicone irradiada por 150 horas.



**Figura 12:** Fotografia da vista lateral superior da placa de PEBD/silicone irradiada por 300 horas.

A Figura 13 apresenta a vista frontal e distal do composto PEBD/etilcianoacrilato irradiado por 300 horas.

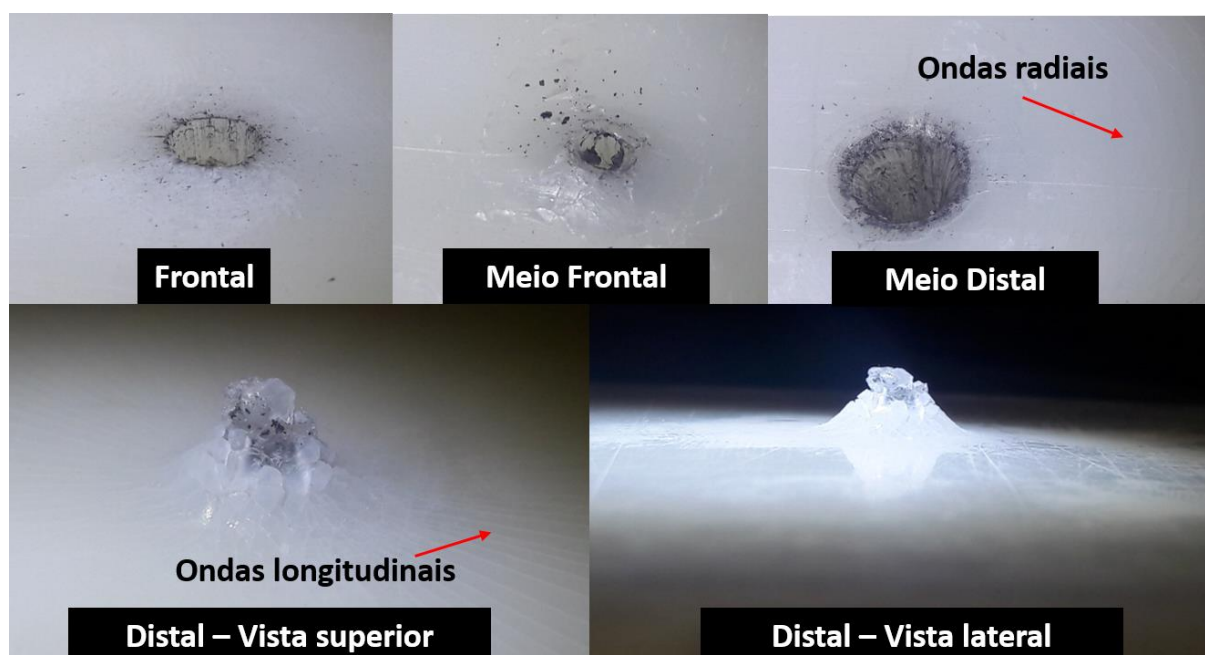
A

B

C

D

E



**Figura 13:** Fotografias da placa de PEBD irradiada por 300 horas e fixada com adesivo a base de etilcianoacrilato.

A deformação apresentada na face distal das placas caracteriza a propagação de ondas longitudinais, enquanto que na interface das placas (Figura 13C) nota-se a presença de ondas radiais.

Apesar do comportamento frágil do PEBD em condições estáticas (ensaio de tração), no comportamento dinâmico do PEBD, este apresenta um comportamento tenaz como observado na Figura 13E.

#### 4 CONCLUSÃO

A análise dos resultados obtidos neste trabalho e as informações presentes na literatura nos permitiram concluir que:

- A exposição à radiação ultravioleta nos tempos estudados produziu reticulação com efeito expressivo.
- A degradação oxidativa não pode ser avaliada através do índice de oxidação, entretanto a dissolução de uma das bandas na espectroscopia no infravermelho evidencia a ocorrência de cisão molecular.
- A temperatura de fusão cristalina e o grau de cristalinidade na região superficial apresentaram redução para os grupos irradiados quando comparados ao material na condição de “como recebido” e mantiveram-se quase constantes na região central das placas.
- O comportamento mecânico sob tração do polietileno de baixa densidade apresentou comportamento frágil após a irradiação, diminuindo o alongamento na fratura e aumentando o módulo de Young.
- Todos os compósitos ensaiados balisticamente foram perfurados (penetração completa), entretanto o adesivo de silicone foi mais eficiente do que o adesivo a base de etilcianoacrilato, pois não apresentou delaminação completa das camadas após o impacto.

- A análise fratográfica, caracterizou os mecanismos de ondas dominantes após a deformação e mostrou ser o comportamento dinâmico do material mais tenaz quando comparado ao comportamento estático.

## 5 REFERÊNCIAS

- [1] PINTO, J.C.; BRASKEM – “Impactos Ambientais Causados Pelos Plásticos – uma discussão abrangente sobre os mitos e os dados científicos”, Planeta sustentável, 2012.
- [2] NIKNEZHAD, S.; ISAYEV, A. I. - “Online Ultrasonic Film Casting of LLDPE and LLDPE/Clay Nanocomposites”, J. APPL. POLYM. SCI. 2013, DOI: 10.1002/APP.38725.
- [3] COUTINHO, F.M.B.; MELLO, I.L.; SANTA MARIA, L.C.; - “ Polietileno: Principais tipos, propriedades e aplicações”, Polímeros: Ciência e Tecnologia, v.13, nº1, p.1-13, 2003.
- [4] YURI, G., GRUBER, W. -“ 2-cianoacrilatos. Síntese, propriedades e aplicações” - Russ. Chem. Rev., 66, pp. 953-962, 1997.
- [5] SINGER, A. J., et al – “Advances in Structural Adhesive Bonding” - American Journal of Emergency Medicine, 26, p. 490–496, 2008.
- [6] SASKA, S.E.; HOCHULI-VIEIRA, A. M.; et al – “Fixation of autogenous bone grafts with ethylcyanoacrylate glue or titanium screws in the calvaria of rabbits.” Int. J. Oral Maxillofac. Surg.; 38, p.180–186, 2009.
- [7] GHOSH, D., PANCHOLI, L. SATHAYE, A., - “Estudos Comparativos de Juntas Aderentes em Automóveis”- SAE Technical Paper, 01, 0788, 2014.
- [8] BLOOMFIELD, L.A. – “Primer system for bonding conventional adhesives and coatings to silicone rubber” - International Journal of Adhesion & Adhesives, 68 p. 239–247, 2016.
- [9] LI, J. et al – “A reliability study of adhesion mechanism between liquid crystal polymer and silicone adhesive” - Microelectronics Reliability, 52, p. 2962–2969, 2012.
- [10] BUYL, F. – “Silicone sealants and structural adhesives” - International Journal of Adhesion & Adhesives, 21, p. 411–422, 2001.
- [11] QUINEY, D.; AYRE, W.N.; MILWARD, P. – “The effectiveness of adhesives on the retention of mandibular free end saddle partial dentures: an in vitro study” - Journal of Dentistry, S0300-5712, 30118-5, 2017.
- [12] ARTOPOULOU, I.I.; et al – “Peel strength and interfacial characterization of maxillofacial silicone elastomers bonded to titanium” - Dental materials, 32, p.137–147, 2016.
- [13] TOLIA, G; Li, S.K. – “Study of drug release and tablet characteristics of silicone adhesive matrix tablets” - European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 82, p. 518–525, 2012.
- [14] FECHINE, G.J.M; SANTOS, J.A.B; RABELLO, M.S. - Avaliação da fotodegradação de poliolefinas através de exposição natural e artificial. Química Nova, vol.29, n.4, pp.674-680, 2006
- [15] LOPES, W.A.; FASCIO, M. – “Esquema Para Interpretação De Espectros De Substâncias Orgânicas Na Região Do Infravermelho” - Quim. Nova, Vol. 27, No. 4, 670-673, 2004.

- [16] CARRASCO, F.; PAGES, P.; et al. – “ Artificial aging of high density polyethylene by ultraviolet irradiation” – European Polymer Journal, v.37, p.1457-1464,
- [17] HADAD, D.; GERESH, S.; SIVAN, A. Biodegradation of polyethylene by the thermophilic bacterium *Brevibacillus borstelensis*. J. App. Microbiol., n. 98, p. 1093-1100, 2005.
- [18] KHABBAZ, F.; ALBERTSSON, A.C.; - “RapidTest Methods for Analyzing Degradable Polyolefins with a Pro-Oxidant System” – Journal of Applied Polymer Science, Vol.79, p.2309–2316, 2001. PINTO, J.C.; BRASKEM – “Impactos Ambientais Causados Pelos Plásticos – uma discussão abrangente sobre os mitos e os dados científicos”, Planeta sustentável, 2012.