



ÁREA TEMÁTICA: GESTÃO AMBIENTAL

**POLIETILENO OXIBIODEGRADÁVEL:
DE SOLUÇÃO A UM PROBLEMA SECUNDÁRIO**

*João Augusto Osório Brandão*¹ (jaobrandao@yahoo.com.br), *Fernando Dal Pont Morisso*² (morisso@feevale.br), *Edson Luiz Francisquetti*³ (edson.francisquetti@farroupilha.ifrs.edu.br),
*Ruth Marlene Campomanes Santana*¹ (ruth.santana@ufrgs.br)

1 Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre/RS

2 Universidade Feevale – Novo Hamburgo/RS

3 Instituto Federal do Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha – Farroupilha/RS

RESUMO

O uso crescente de polímeros não biodegradáveis, como na produção de sacolas, é acompanhado por um problema que chama a atenção de pesquisadores, ambientalistas e governos no mundo: o acúmulo de resíduos plásticos no meio ambiente. Quando de dimensões inferiores a 5 mm, são denominados microplásticos e, além de contaminarem o solo, rios e oceanos, tem-se investigado a contaminação do ar por eles. Uma alternativa para favorecer a degradação de resinas olefínicas, as mais utilizadas, é processá-las com pró-oxidantes que favorecem a sua degradação abiótica por termooxidação e fotooxidação, produzindo fragmentos oxigenados que podem ser utilizados como nutrientes por microrganismos. Quando processados com esses aditivos, os polímeros são chamados oxibiodegradáveis. Neste trabalho, foi avaliada a termodegradação do polietileno (PE) processado sem e com 2 diferentes pró-oxidantes, d2wTM e benzoína, para que fosse verificado se a presença dos aditivos favoreceria a oxidação ou a reticulação de cadeias, processo que pode levar à formação de microplásticos. Os filmes de PEAD/PEBD foram processados por extrusão-sopro e expostos em estufa a 58°C com circulação forçada de ar. A caracterização foi feita por viscosimetria, FTIR, TGA e MEV. Os resultados indicaram que o PE sofreu reticulação, mais evidente nos filmes aditivados. A formação de ligações cruzadas foi maior para o filme processado com d2wTM, seguido do filme com benzoína. Assim, nas condições utilizadas, os filmes de PE oxibiodegradável sofrem reticulação e o que seria uma solução para o problema do acúmulo de resíduos plásticos passaria a ser um problema secundário, a formação de microplásticos.

Palavras-chave: Microplásticos, Polietileno oxibiodegradável, Reticulação.

**OXYBIODEGRADABLE POLYETHYLENE:
FROM A SOLUTION TO A SECONDARY PROBLEM**

ABSTRACT

The growing use of non-biodegradable polymers, as in the production of bags, is accompanied by a problem that draws the attention of researchers, environmentalists and governments around the world: the accumulation of plastic waste in the environment. When their dimensions are smaller than 5 mm, they are called microplastics and, besides contaminating the soil, rivers and oceans, the contamination of the air by them has been investigated. An alternative to favor the degradation of olefin resins, the most widely used, is to process them with pro-oxidants that favor their abiotic degradation by thermo-oxidation and photo-oxidation, producing oxygenated fragments that can be used as nutrients by microorganisms. When processed with these additives, the polymers are called oxybiodegradable. In this work, the thermodegradation of polyethylene (PE) processed without and with two different pro-oxidants, d2wTM and benzoin, was evaluated to verify whether the presence of additives would favor oxidation or cross-linking of chains, a process that can lead to the formation of microplastics. The HDPE/LDPE films were processed by blow extrusion and exposed in an oven at 58°C with forced air circulation. Characterization was done by viscosimetry, FTIR, TGA and SEM. The results indicated that the PE underwent cross-linking, more evident in the additivated films. Cross-link formation was higher for the film processed with d2wTM, followed



by the film with benzoin. Thus, under the conditions used, oxybiodegradable PE films suffer cross-linking and what would be a solution to the problem of accumulation of plastic waste would become a secondary problem, the formation of microplastics.

Keywords: Microplastics, Oxy-biodegradable Polyethylene, Cross-linking.

1. INTRODUÇÃO

O uso crescente dos polímeros desde a II Guerra Mundial, em substituição, inclusive, a outras classes de materiais como metais, cerâmicas e madeira, trouxe consigo um grande problema ambiental: o acúmulo de resíduos plásticos no meio ambiente (THOMPSON *et al*, 2009). A utilização de resinas petroquímicas se destaca, diante da facilidade de obtenção e processamento e frente ao baixo custo, como no caso do polietileno, largamente utilizado na produção de sacolas e outras embalagens (KOUTNY; LEMAIRE; DELORT, 2006). No entanto, esses polímeros possuem baixa degradação em condições ambientais normais e por isso acumulam-se nos rios, solos e oceanos. Mais recentemente, a partir do ano 2000, tem-se verificado, também, a presença de polímeros no ar, na forma de microplásticos (CHEN; FENG; WANG, 2020), inclusive, em lugares remotos.

Uma alternativa para a redução do acúmulo de artefatos plásticos descartáveis na natureza é a utilização de polímeros biodegradáveis, ou seja, polímeros com fácil assimilação por microrganismos depois de descartados em ambiente adequado. O preço e as exigências específicas de processamento desses polímeros, no entanto, inviabilizam sua utilização (SIRACUSA *et al*, 2008). A outra opção, economicamente mais atrativa, tem sido a utilização de aditivos pró-degradantes, também conhecidos como pró-oxidantes, no processamento de poliolefinas com o intuito de torná-los oxibiodegradáveis. A oxibiodegradação é o termo usado para descrever os dois estágios de degradação dos polímeros olefínicos, sendo o primeiro a oxidação abiótica e o segundo a degradação biótica, também denominada microbiológica. Na oxidação abiótica o polímero é reduzido a fragmentos oxigenados, tais como ácidos carboxílicos, cetonas, aldeídos e lactonas, de menor massa molar e na fase biótica tais fragmentos são degradados por ação catalítica de enzimas produzidas por microrganismos (LIU *et al*, 2014) e utilizados como nutrientes. Os tipos de degradação abiótica aceleradas pela presença de aditivos pró-oxidantes são a fotooxidação e a termooxidação (REDDY *et al*, 2008) e levam à produção de ácidos carboxílicos, ésteres, cetonas, lactonas, por exemplo (DE PAOLI, 2008). Os pró-oxidantes podem ser sais orgânicos de metais de transição, muitas vezes, estearatos, cujos metais podem ser cobalto, ferro e manganês (ANTUNES *et al*, 2017). No entanto, devido à possibilidade de contaminação do meio ambiente por metais pesados, a pesquisa por pró-oxidantes totalmente orgânicos tem se intensificado. A benzoína, contendo carbonila e anéis aromáticos em sua estrutura química, que podem atuar como agentes cromóforos e termolábeis e favorecer foto e termooxidação, é um exemplo (MONTAGNA, 2013, ROSA, 2019).

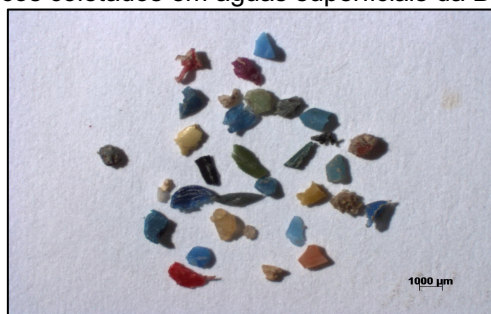
No entanto, a utilização de pró-degradantes no processamento de polietileno para obtenção de filmes para sacolas descartáveis ou outras embalagens oxibiodegradáveis, muito comuns em resíduos sólidos urbanos, pode estar associado a um problema secundário: a geração de microplásticos (DE PAOLI, 2008). Sob determinadas condições, os pró-degradantes parecem favorecer a reticulação do polietileno nos filmes, fazendo com que haja aumento da dureza do polímero que, na forma de filmes, perde sua flexibilidade e se torna frágil. A fragilidade, por sua vez, pode levar à produção de fragmentos de PE reticulado, com dimensões inferiores a 5 mm e que apresenta difícil degradação, impossibilitando que, posteriormente, sejam utilizados como nutrientes por algas, fungos e bactérias.

O termo microplástico foi empregado na literatura em 2004, em artigo publicado que relatava a existência de partículas plásticas de tamanho reduzido encontradas nos mares (THOMPSON *et al*, 2004), mesmo que estudos anteriores já investigassem os impactos de fragmentos plásticos para a vida marinha, mas sem dar a eles esse nome. Sua definição mais difundida, no entanto, só foi proposta em 2008 pela *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)* (ARTHUR; BAKER; BAMFORD, 2008). Os microplásticos presentes no meio ambiente podem ser classificados em duas categorias: microplásticos primários e microplásticos secundários. O



microplástico primário é aquele que já foi produzido em tamanho microscópico, tais como os *pellets*. Os microplásticos secundários são fragmentos de polímeros, provenientes da degradação de artefatos descartados no meio ambiente, podendo ocorrer tanto no ambiente terrestre quanto aquático. Estes possuem composição variada que inclui polietileno e polipropileno (ANTUNES *et al*, 2017). No Brasil são alvos de pesquisas constantes em estuários, baías e lagos, locais onde são confundidos com alimentos e acabam levando à intoxicação de diversos animais, incluindo peixes e pássaros (OLIVATTO *et al*, 2018). A Figura 1 apresenta exemplos de microplásticos coletados em águas superficiais da Baía de Guanabara – RJ.

Figura 1 - Microplásticos coletados em águas superficiais da Baía de Guanabara-RJ.



Fonte: Olivatto *et al* (2018).

Os efeitos causados pelos microplásticos sobre a saúde humana e sobre a saúde dos animais e plantas em geral, ainda estão sendo investigados. No entanto, é conhecido que grande parte do problema se deve à ingestão das partículas poliméricas que, em sua maioria, sofrem adição de aditivos ao serem processadas. Os aditivos, por sua vez, mesmo estando em pequenas concentrações, podem ser nocivos à saúde.

Neste sentido, avaliar se o uso de pró-oxidantes no processamento de filmes de polietileno é capaz de favorecer a reticulação, sob determinadas condições e, conseqüentemente, levar à produção de microplásticos, é de grande importância para a difusão ou não do uso de sacolas oxibiodegradáveis de PE.

2. OBJETIVO

Avaliar o processo de degradação térmica do PE em filmes tubulares de PEAD/PEBD (90/10) processados sem e com 1% de dois diferentes pró-degradantes, um comercial, o d2wTM (utilizado para polietileno e polipropileno), e o outro totalmente orgânico, a benzoína, verificando se o processo de envelhecimento na presença dos pró-oxidantes, na temperatura adotada, favorece a oxidação ou a reticulação de cadeias, processo que, se presente, pode levar à fragilização dos filmes e produção dos microplásticos.

3. METODOLOGIA

3.1 Materiais

Neste trabalho, foram utilizados polietileno de alta densidade (PEAD), de *grade* HE 150, polietileno de baixa densidade (PEBD), de *grade* EB 853/72, ambos produzido pela Braskem (Brasil). Aditivo d2wTM, em *masterbatch*, produzido pela Symphony Environmental; Benzoína, da Merck KGaG, com grau de pureza superior a 99%; Decalina, produzida pela Neon, com grau de pureza superior a 99%.

O presente estudo foi realizado em duas fases: o processamento dos filmes de PEAD/PEBD e a exposição dos mesmos à termodegradação em estufa a 58° e com circulação forçada de ar.

3.2 Processamento dos filmes de PEAD/PEBD

Foram produzidos três filmes de PEAD/PEBD, com proporção mássica de 90/10. O primeiro, constituído apenas por PEAD e PEBD, foi nomeado como PEAD/PEBD_Puro. O segundo,



aditivado com 1% de benzoína, foi nomeado como PEAD/PEBD_Benzoína e o terceiro, aditivado com 1% do aditivo comercial d2w™, foi nomeado como PEAD/PEBD_d2w™.

O processamento foi realizado em uma extrusora monorosca da marca SEIBT, modelo ES 35-FR, com cinco zonas de aquecimento, 40 mm de diâmetro de matriz e 35 mm de diâmetro de rosca e com 5 zonas de aquecimento. Os três filmes foram processados com o mesmo perfil de temperatura, 120°C (alimentação), 150°C, 175°C, 185°C e 210°C (cabeçote).

3.3 Exposição à termodegradação em estufa a 58°

As amostras dos filmes, com medidas de 15 x 15 cm, foram expostas à termodegradação em estufa a 58°, com circulação forçada de ar, por 90 e 150 dias, conforme Figura 2. A temperatura de 58°C foi utilizada por estar próxima da temperatura observada em sistemas de compostagem.

Figura 2 – Amostras dos filmes de PEAD/PEBD dispostos em estufa a 58°C



3.4 Caracterização dos filmes

Os filmes foram caracterizados após o processamento por extrusão tubular e após 90 e 150 dias de exposição à termodegradação em estufa a 58°C.

3.4.1 Viscosimetria de soluções diluídas

Para a determinação da massa molar viscosimétrica média foram preparadas 5 soluções de polietileno nas concentrações 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 e 1,0 g/dL para cada filme analisado, utilizando a decalina (Neon) como solvente. As soluções foram obtidas, uma a uma, a partir da determinação da massa necessária para preparo de 25 ml de cada uma das concentrações mencionadas. A dissolução do polímero se deu sob agitação e em temperatura de 140°C por uma hora. As viscosidades das soluções foram medidas em viscosímetro Cannon-Fenske (n° 50) com diâmetro interno de 0,44 mm. Os procedimentos foram realizados de acordo com as normas ASTM D445 e ASTM D446. As análises foram feitas com o viscosímetro imerso em banho termostático de óleo de silicone da marca SOLAB, Modelo SL 150, a 135°C (BRANDUPT, IMMERGUT, GRULKE, 2009), variando $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

Inicialmente, foram determinadas as viscosidades relativas, seguidas das viscosidades específicas reduzidas (η_{esp}/C) e viscosidades inerentes ($\ln \eta_{\text{rel}}/C$) de cada uma das soluções para cada filme avaliado. Plotados os gráficos de tais viscosidades, foi determinada a viscosidade intrínseca do polietileno utilizado no preparo da solução, a partir da extrapolação das retas obtidas por regressão linear quando a concentração tende a 0g/dL. Os valores encontrados para as duas



retas tendem ao mesmo valor e, por esse motivo, foi utilizada a média dos mesmos como viscosidade intrínseca ($[\eta]$)

Para a determinação da massa molar viscosimétrica média do polietileno presente nas amostras, foi utilizada a equação de Mark-Houwink-Sakurada, que relaciona a viscosidade intrínseca e \overline{Mv} , conforme apresentado na Equação 1,

$$[\eta] = k. (\overline{Mv})^a \quad \text{(Equação 1)}$$

na qual, $[\eta]$ é viscosidade intrínseca encontrado para o de polietileno; k e a são as constantes para o sistema polímero-solvente que, para o polietileno-decalina, valem 62×10^{-5} dL/g e 0,7, respectivamente (BRANDUPT; IMMERGUT; GRULKE, 2009); e \overline{Mv} é a massa molar viscosimétrica média.

3.4.2 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

As análises de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) foram realizadas em equipamento da marca Perkin Elmer, modelo Frontier. Todos os filmes foram avaliados no modo ATR (Refletância Total Atenuada). Os espectros foram obtidos em temperatura ambiente de 25°C, umidade do ar controlada em 30% em região de absorção variando de 4000 a 650 cm^{-1} , com 10 repetições para cada amostra.

A carbonila possui absorção de radiação infravermelha em diferentes bandas, dependente da função orgânica, sendo elas: ácidos carboxílicos (1712 cm^{-1}), cetonas (1723 cm^{-1}), aldeídos (1730 cm^{-1}) e lactonas (1780 cm^{-1}) (CORTI *et al*, 2010; GULMINE *et al*, 2003). A partir da absorção, é possível calcular o nível de oxidação do material polimérico através do índice de carbonila, utilizando-se a Equação 2:

$$IC = \frac{A_1}{A_2} \quad \text{(Equação 2)}$$

na qual A_1 é a área de absorção da banda entre 1700 e 1780 cm^{-1} , referentes aos picos dos grupos contendo carbonilas e A_2 é a área da banda em 1463 cm^{-1} , considerada uma das bandas do polietileno que não sofre alteração (GULMINE *et al*, 2003).

3.4.3 Análise termogravimétrica (TGA)

As análises termogravimétricas foram realizadas em instrumento da marca Perkin Elmer, modelo TGA 4000, em atmosfera de N_2 (20 mL/min.). O aquecimento para avaliação do processo de degradação térmica foi feita em intervalo de temperatura de 30 a 900°C, sob taxa de aquecimento de 20°C/min. As amostras tinham, aproximadamente, 10 mg.

3.4.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As análises foram realizadas no seguinte equipamento: Microscópio Eletrônico de Varredura Jeol, modelo JSM6510LV, com acessório de espectroscopia de energia dispersiva Thermo Scientific, modelo Ultra Dry; Metalizadora Denton Vacuum, modelo Desk V.

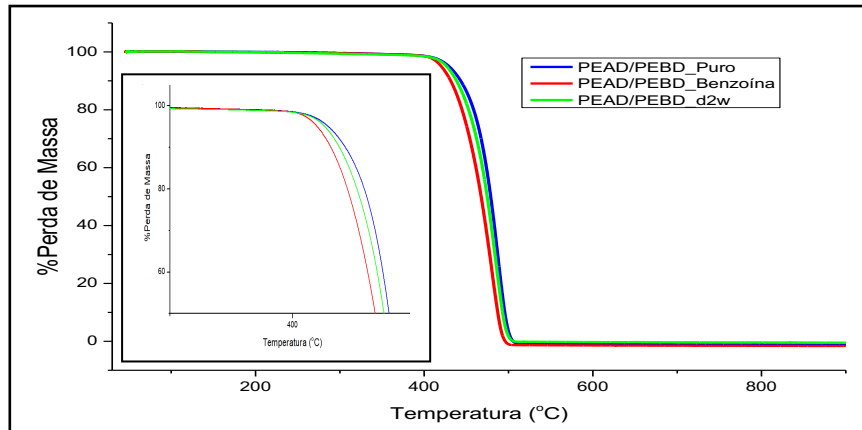
As condições de análise foram as seguintes: micrografias coletadas a partir das amostras metalizadas com ouro por meio de procedimento padrão, com feixe de elétrons com 10 kV de energia e ampliações de 10.000x.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

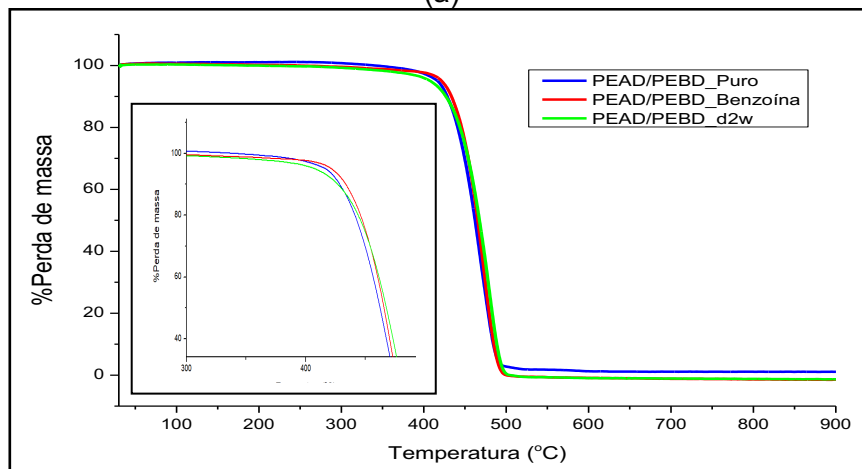
4.1 Viscosimetria de soluções diluídas.

Os valores da viscosidade intrínseca $[\eta]$ e massa molar viscosimétrica média (\overline{Mv}) do PE, calculada pela Equação 1, são apresentados na Tabela 1.

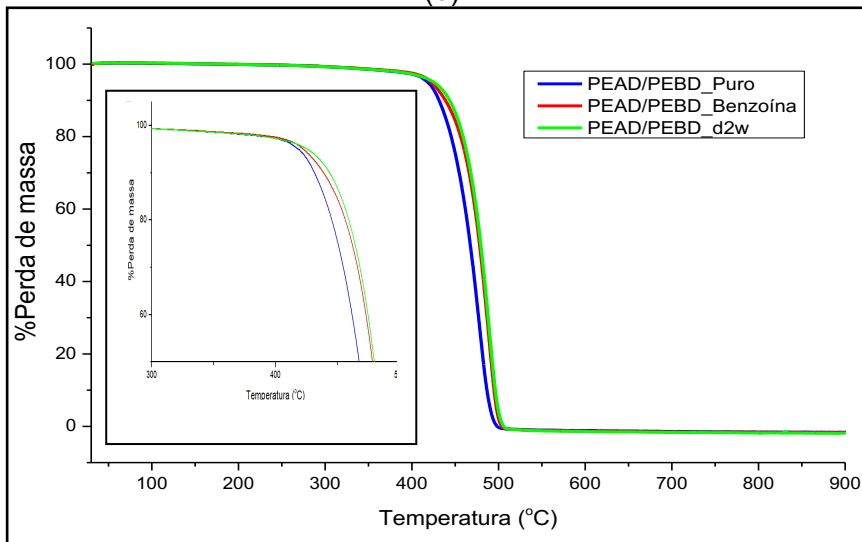
Tabela 1 - Valores de $[\eta]$ e \overline{Mv} do PE nas amostras avaliadas



(a)



(b)





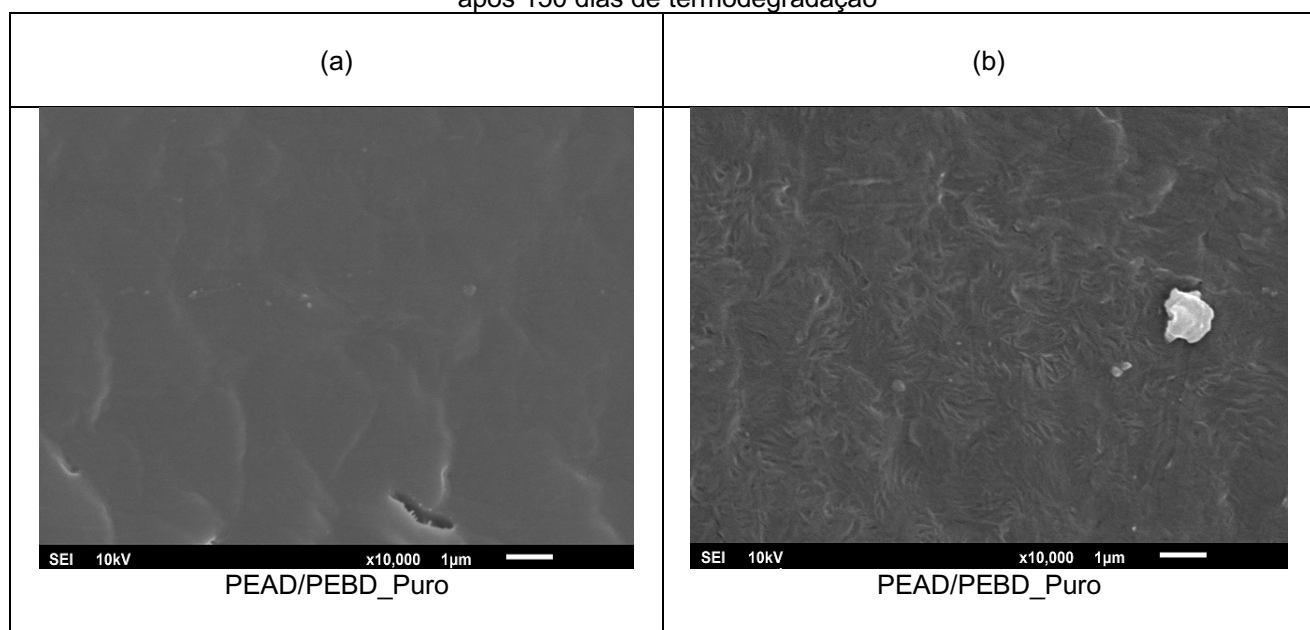
(c)

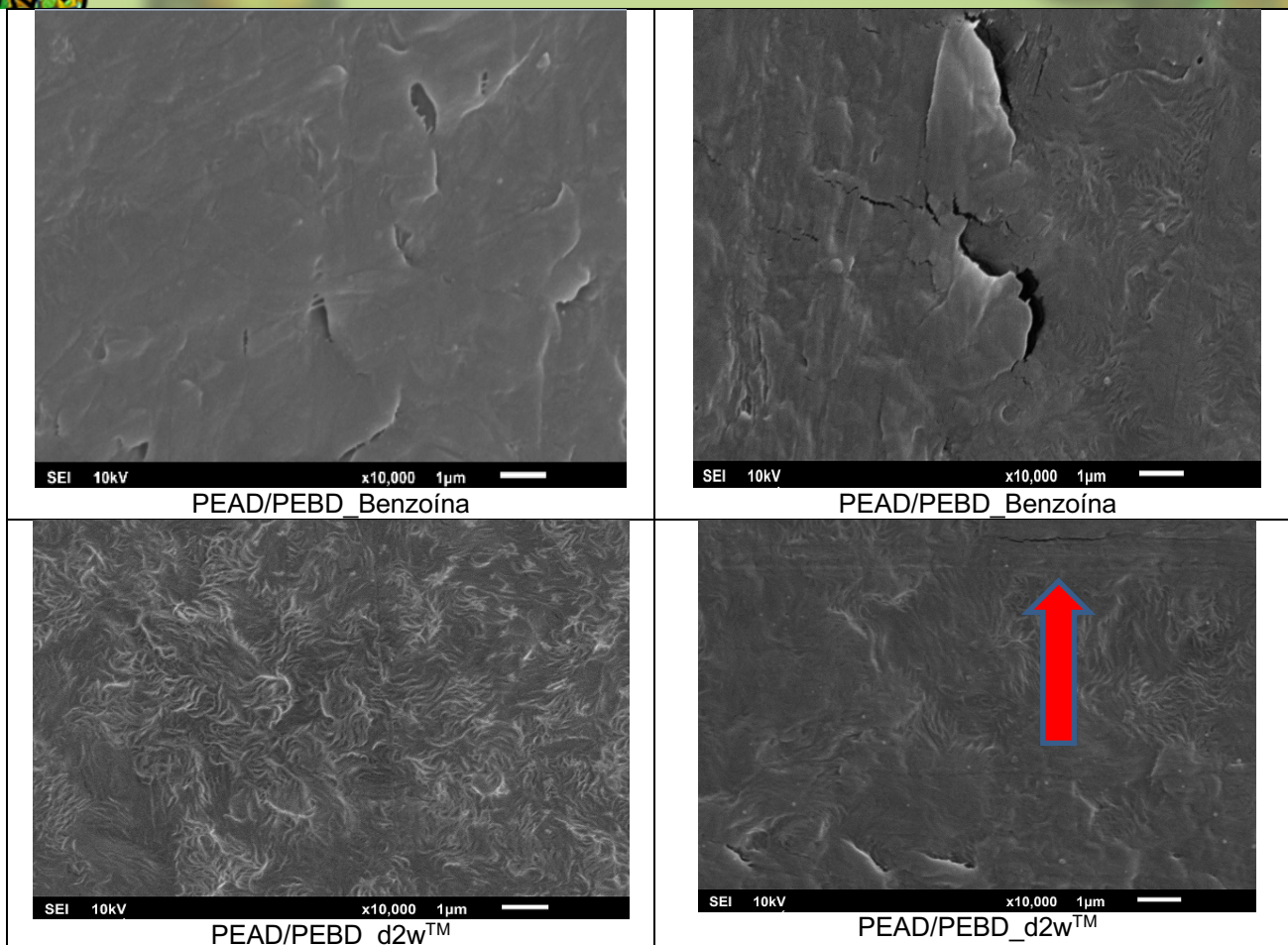
As curvas de TG após o processamento do PE por extrusão tubular (Figura 3-a) indicam que o filme PEAD/PEBD_Puro era o mais estável, estando mais à direita no gráfico, dentre as amostras avaliadas, seguidas do PEAD/PEBD_d2wTM e PEAD/PEBD_Benzoína, respectivamente. As estabilidades térmicas são condizentes com as massas molares do PE nos filmes. Após 90 dias de exposição (Figura 3-b), verifica-se uma alteração, tendo o filme PEAD/PEBD_Puro apresentando menor estabilidade térmica, dando indícios da reticulação dos filmes contendo aditivos. Neste período, o filme PEAD/PEBD_d2wTM foi o que apresentou maior estabilidade térmica, seguido do filme PEAD/PEBD_Benzoína. As curvas de TG dos filmes após 150 dias (Figura 3-c) confirmam a maior estabilidade térmica do filme PEAD/PEBD_d2wTM, seguido do filme PEAD/PEBD_Benzoína e, por último, o filme PEAD/PEBD_Puro. O aumento da estabilidade térmica, associado à variação da massa molar do PE nos filmes e à baixa taxa de oxidação verificada nas amostras sugere a reticulação do PE durante a exposição à termodegradação a 58°C. O estabelecimento de ligações cruzadas entre as cadeias PE aumenta sua estabilidade térmica, ou seja, torna mais difícil a sua degradação mediante aquecimento (KHONAKDAR, 2003).

4.4 MEV

As micrografias da superfície dos filmes antes e após 150 dias de exposição à termodegradação são apresentadas na figura 4.

Figura 4 – Micrografias dos filmes de PEAD/PEBD (a) após o processamento por extrusão tubular e (b) após 150 dias de termodegradação





As imagens apresentadas na Figura 4-a indicam que todos os filmes, com ou sem aditivos, apresentavam diferenças na morfologia da superfície entre si. O filme PEAD/PEBD_Puro foi o que apresentou maior regularidade de superfície. O filme PEAD/PEBD_Benzoína apresentou superfície irregular, possivelmente pela dificuldade de homogeneização devido à presença do composto orgânico polar. O filme PEAD/PEBD_d2w™ apresentou alterações que podem ser justificada pela não dissolução total do *masterbatch* do aditivo comercial. Após 150 dias de exposição (Figura 4-b), os filmes apresentaram alguma reorganização molecular. O filme PEAD/PEBD_Puro, apesar de não apresentar microfissuras, demonstra uma nova organização do polímero. No entanto, a ausência de microfissuras demonstra o baixo grau de oxidação do PE. O filme PEAD/PEBD_Benzoína foi o único que apresentou fissuras visíveis pela técnica, indicando que, apesar da reticulação ter prevalecido no primeiro período de exposição, a oxidação tornou o filme fragilizado no final do experimento, indicando que, paralelamente à formação de ligações cruzadas, ocorreu a oxidação das cadeias do polímero. Do mesmo modo, o filme PEAD/PEBD_d2w™ apresentou alterações, no entanto, o aparecimento de poucas microfissuras indica uma baixa taxa de degradação por oxidação. A fissura foi apontada com a seta vermelha. Os resultados são condizentes com as variações de massa molar do PE nos filmes, que indicam a possibilidade da concomitância entre reticulação e oxidação de cadeias. No período avaliado não foram obtidos microplásticos. Entretanto, foram verificadas alterações visuais dos filmes que ficaram mais amarelos, indicando oxidação, e alterações na sua flexibilidade, indicando que, se submetidos a maior tempo de ensaio, ficariam mais frágeis a esforços mecânicos com possibilidade posterior de ruptura do material mediante qualquer esforço e produção de fragmentos plásticos, os microplásticos.



5. CONCLUSÃO

O estudo realizado para avaliar o processo de termodegradação do PE em estufa a 58°C, processado com e sem aditivos, demonstrou que, nesta temperatura, mesmo na presença do oxigênio do ar, há evidências de que o polímero reticula e não tem sua oxidação acelerada ou aumentada pelos pró-oxidantes. Portanto, considerado apenas esse ambiente de degradação, o PE teria sua dureza aumentada devido ao estabelecimento de ligações cruzadas entre as cadeias mas, em se tratando de filmes flexíveis, eles se tornariam frágeis e, mediante qualquer esforço físico, inclusive do vento, poderiam sofrer fraturas e serem lançados no meio ambiente na forma de microplásticos. Desta maneira, é necessário que outros testes sejam realizados, incluindo um maior tempo de exposição à termodegradação nas condições utilizadas, para que sejam estabelecidos os reais riscos e benefícios na utilização do PE oxibiodegradável na confecção de embalagens de filmes flexíveis. Com os resultados obtidos, o que se evidencia é que a utilização de polímeros oxibiodegradáveis pode deixar de ser uma solução para a redução do acúmulo de resíduos sólidos e se tornar um problema secundário, ou seja, a produção de microplásticos.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPQ, pelo suporte financeiro. Ao IF/RS Campus Farroupilha e Feevale, pelo auxílio na realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS

ANTUNES, M.C.; AGNELLI, J.A.M.; BABETTO, A.L.; BONSE, B.C.; BETTINI, S.H.P. Abiotic thermo-oxidative degradation of high-density polyethylene: effect of manganese stearate concentration. *Polymer Degradation and Stability*, V. 143, p. 95-103, 2017.

ARTHUR, C.; BAKER, J.; BAMFORD, H. Proceedings of the International research workshop on the occurrence, effects, and fate of micrplastic marine debris. Sept. 9-11. NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-30, 2008.

BRANDUP, J.; IMMERGUT, E.H.; GRULKE, E.A. *Polymer Handbook*. Second Edition, New York: Wiley – Interscience Publication, 2009, VII – 69 p.

CHEN, G.; FENG, Q.; WANG, J. Mini-review of microplastic in the atmosphere and their risk to humans. *Science of the Total Environmental*, V. 703, Art. ID. 135504, 2020.

CORTI, A.; MUNIYASAMY, S.; VITALI, M.; IMAM, S.H.; CHIELLINI, E. Oxidation and biodegradation of polyethylene films containing pro-oxidant additives: synergistic effects of sunlight exposure, termal aging and fungal biodegradation. *Polymer Degradation and Stability*, V. 95, p. 1106-1114, 2010.

CUADRI, A.A.; MARTIN – ALFONSO, J.E. The effect of termal and termo-oxidative degradation conditions on rheological, chemical and termal properties of HDPE. *Polymer Degradation and Stability*, V. 141, p. 11-18, 2017.

DE PAOLI, Marco A. *Degradação e Estabilização de Polímeros*. São Paulo: Ed. Artliber, 2008. 266 p.

GULMINE, J.V.; JANISSEK, P.R.; HEISE, H.M.; AKCELRUD, L. Degradation profile of polyethylene after artificial accelerated weathering. *Polymer Degradation and Stability*, V. 79, p.385-397, 2003.

KHONAKDAR, H.A.; MORSHEDIAN, J.; WAGENKNECHT, V.; JAFARI, S.H. An investigation of chemical effect on properties of high-density polyethyelene. *Polymer*, V. 44, p.4301-4309, 2003.



LIU, X.; GAO, C.; SANGWAN, P.; YU, L.; TONG, Z. Accelerating the degradation of polyolefins through additives and blending. *Journal of Applied Polymer Science*, V. 131, nº 18, Art. ID 40750, p. 9001-9015, 2014.

MONTAGNA, L.S.; FORTE, M.M.C.; SANTANA, R.M.C. Induced degradation of polypropylene with an organic pro-degradant additive. *Journal of Material Science and Engineering*, V. 3, n. 2, p. 123-131, 2013.

OLIVATTO, G.P.; CARREIRA, R.; TORNISIELO, V.L.; MONTAGNER, C.C. Microplásticos: contaminantes de preocupação global no antropoceno. *Rev. Virtual Quím.* V. 10, n. 6, p. 1968-1989, 2018.

RABEK, Jan F. *Polymer photodegradation – Mechanisms and experimental methods*. London: Chapman & Hall, 1995. 82p.

REDDY, M.M.; GUPTA, Rahul.K.; GUPTA Rakesh.K.; BHATTACHARYA, S.N.; PARTHASARATHY, R. Abiotic oxidation studies of oxo-biodegradable polyethylene. *Journal of Polymers and the Environment*, V. 16, p. 27-34, 2008.

ROSA, T.P.S. *Polietileno modificado com pró-degradante orgânico para aplicação em embalagens flexíveis*. Porto Alegre, 94 p., 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SIRACUSA, V.; ROCCULI, P.; ROMANI, S.; ROSA, M.D. Biodegradable polymer for food: a review. *Trends in Food Science & Technology*, V. 19, p.634-643, 2008.

THOMPSON, R.C., SWAN, S.H.; MOORE, C.J.; SAAL, F.S. Our plastic age. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, V. 364, p. 1973-1976, 2009.

THOMPSON, R.C.; OLSEN, Y.; MITCHELL, R.T.; DAVIS, A.; ROWLAND, S.J.; JOHN, A.W.G.; MCGONIGLE, D.; RUSSEL, A.E. Lost at sea: where is all the plastic. *Science*, V. 304, p. 838, 2004.