

ESTUDO DA VIABILIDADE DE CONFECÇÃO DE UM CÁRTER AUTOMOTIVO COM A BLENDA PC/ABS

Cauê Parisati de Carvalho (Fatec Zona Leste) E-mail: caueparisati@gmail.com
Daniel Quaresma Rinaldi de Freitas (Fatec Zona Leste) E-mail: quaresma.qrf2@gmail.com
Rogério Gonçalves da Silva (Fatec Zona Leste) E-mail: rogeriomixerr@gmail.com
Talita Angelica dos Santos (Fatec Zona Leste) E-mail: talita.santos51@fatec.sp.gov.br

Resumo: Para otimizar o desempenho do veículo, é desejável a substituição de partes metálicas por materiais mais leves, dentre os materiais que podem ser usados para essa finalidade destaca-se a blenda polimérica PC/ABS que apresentam baixa densidade e propriedades vantajosas para o setor automotivo. Portanto, este trabalho estudou a viabilidade de substituição do cárter metálico de alumínio por um cárter automotivo de PC/ABS por meio de ensaios mecânicos de tração, flexão e impacto, ensaio de degradação em óleo automotivo, espectroscopia na região infravermelha (FTIR), análise dinâmico mecânica (DMA), simulação computacional, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e também realizou a impressão 3D de um protótipo de cárter automotivo. Os ensaios mecânicos mostraram que houve diminuição da resistência ao impacto e tensão na ruptura após os ensaios de degradação em óleo automotivo, porém, a tensão máxima, módulo Young e resistência à flexão não mostraram alterações significativas antes e após o ensaio de degradação. Os espectros de FTIR indicam que o ABS presente na blenda é responsável pela quimiodegradação e termodegradação durante o ensaio de degradação. O DMA mostrou que a blenda apresenta transição vítrea entre 111 - 148 °C o que permitiria seu uso em um cárter automotivo. A simulação computacional mostrou que existe a possibilidade de aplicação do material em um cárter automotivo, no entanto, há necessidade de ensaios complementares e avaliação do seu uso em escala piloto.

Palavras-chave: blenda PC/ABS, cárter, automotivo, simulação computacional.

STUDY OF THE FEASIBILITY OF MAKING AN AUTOMOTIVE CRANKCASE WITH BLENDA PC/ABS

Abstract: To optimize vehicle performance, it is desirable to replace metallic parts with lighter materials. Among the materials that can be used for this purpose, the PC/ABS polymer blend stands out due to its low density and advantageous properties for the automotive sector. Therefore, this study investigated the feasibility of replacing the aluminum metallic crankcase with a PC/ABS automotive crankcase through mechanical tests such as tensile, flexural, and impact tests, degradation tests in automotive oil, Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), dynamic mechanical analysis (DMA), computational simulation, scanning electron microscopy (SEM), and also conducted the 3D printing of a prototype automotive crankcase. The mechanical tests showed a decrease in impact resistance and tensile strength after degradation tests in automotive oil; however, the maximum stress, Young's modulus, and flexural strength showed no significant changes before and after the degradation test. FTIR spectra indicate that the ABS present in the blend is responsible for chemodegradation and thermodegradation during the degradation test. DMA revealed that the blend exhibits a glass transition temperature between 111-148 °C, which would allow its use in an automotive crankcase. Computational simulation demonstrated the possibility of applying the material in an automotive crankcase; however, further testing and evaluation of its use on a pilot scale are necessary.

Keywords: PC/ABS blend, crankcase, automotive, computer simulation.

1. Introdução

No setor automotivo há uma busca constante pelo aprimoramento do design e desempenho dos veículos (DESHMUKH et al., 2022; HEMAIS, 2003). Para uma melhoria no desempenho veicular, um dos principais fatores é a redução do peso que pode ser alcançada com a utilização de materiais mais leves como polímeros, blendas, compósitos ou nanocompósitos (DESHMUKH et al., 2022; HEMAIS, 2003). Para cada

tonelada de material metálico substituída por polímeros, ocorre uma redução de peso de 90%, resultando em uma economia estimada de 7,5% no consumo de combustível (HEMAIS, 2003). Nesse contexto, o uso de polímeros e blendas no setor automotivo é vantajoso porque melhora o desempenho veicular e ocasiona uma diminuição de custos e de emissões de gases de efeito estufa (DESHMUKH et al., 2022).

Devido a grande vantagem do uso dos materiais poliméricos, atualmente, estima-se que 60% do peso do veículo seja representado por polímeros, algumas partes do veículo, como para-choque, tanque de combustível, radiador, carroceria, forros internos, porta-luvas, caixa de rodas, maçanetas, entre outros, são fabricados com polímeros como polipropileno (PP), polietileno (PE), poliacetal (POM), poliamida (PA), metilmetacrilato (PMMA) ou com compósitos poliméricos como fibra de vidro ou fibra de carbono com resina de poliéster (HEMAIS, 2003). Porém, outras peças de veículos não são fabricadas com polímeros devido aos elevados esforços mecânicos a que são submetidas ou à necessidade de trabalhar em altas temperaturas, por exemplo, as peças estruturais de veículos (colunas estruturais) e peças de motores de veículos que são produzidas com materiais metais como aço e alumínio (DESHMUKH et al., 2022; HEMAIS, 2003).

Dentre as diversas peças metálicas que compõem o veículo, destaca-se o cárter, geralmente fabricado em liga de alumínio. Sua função principal é armazenar o óleo do carro, sendo indispensável para o funcionamento do veículo e para garantir a lubrificação do motor, evitando superaquecimento e separando as impurezas que passaram pelos filtros de óleo (CÁCERES, TOPON-VISARREA e CRUZ, 2021). A temperatura do óleo que fica armazenado dentro do cárter, em condições normais do veículo, mantém-se entre 40 e 70 °C, mas caso haja algum tipo de desregulação no motor, essa temperatura pode chegar a temperaturas entre 90 e 100 °C (DYSON, PRIEST e LEE, 2023). Logo, para a temperatura de trabalho do cárter existe a possibilidade de utilizar polímeros que possuem temperatura de transição vítrea superior a 100 °C. Outro fator que merece destaque é que para minimizar o índice de falhas do cárter utiliza-se o “protetor de cárter”, que é um revestimento metálico na parte inferior, geralmente feito de aço, cuja função é proteger o cárter de impactos sofridos na parte inferior do veículo. Embora o protetor de cárter não seja um item obrigatório, a maioria dos veículos utiliza essa proteção para evitar danos ao cárter e consequentemente prolongar a vida útil do veículo (SORIANO e ANTONIO, 2016).

Devido à extrema importância do cárter, buscam-se alternativas para substituir o alumínio que atualmente é utilizado em sua fabricação, a fim de reduzir o peso e também o custo da peça, porém, há poucos relatos na literatura sobre cárter automotivo, fabricado com polímeros. Cruz, Topon-Visarrea e Cáceres (2021) estudaram a possibilidade de utilização de resina de poliéster com fibra natural de cabuya e verificaram, por meio de simulação computacional, que o cárter confeccionado com resina de poliéster e fibra de cabuya, com 8 mm de espessura, atenderia aos requisitos mecânicos quando comparado ao cárter de alumínio e reduziria o peso do veículo (CÁCERES, TOPON-VISARREA e CRUZ, 2021).

Embora a utilização de polímeros termofixos na fabricação de cárter automotivo seja vantajosa, os termoplásticos também podem ser estudados para esse fim, devido à menor toxicidade durante o processo produtivo e também à maior possibilidade de reciclagem pós-consumo (SCHLUMMER et al., 2016).

Uma alternativa para substituição dos cárter de alumínio é a utilização de blendas que sejam capazes de proporcionar o equilíbrio ideal de propriedades entre os polímeros que os compõem. Destaca-se neste estudo a blenda PC/ABS formada pelos polímeros PC (policarbonato) e ABS (acrilonitrila-butadieno-estireno). O ABS é um terpolímero composto de meros de acrilonitrila (20 a 30%), butadieno (20 a 30%) e estireno (20 a

60%). A propriedade final do ABS é determinada pela sua composição, a acrilonitrila proporciona boa resistência mecânica e térmica, o butadieno proporciona resistência à fadiga, resistência química e boas propriedades mecânicas como resistência ao impacto e por fim o estireno proporciona brilho, rigidez e também favorece a dureza de processamento. Já o PC é um homopolímero termoplástico de engenharia que é obtido por policondensação de fosgênio e bisfenol-A, é amorfo, possui alta transparência, excelente resistência à tração, estabilidade térmica e alta resistência elétrica, porém, possui propriedades medianas de resistência à degradação química e apresenta difícil processabilidade (CANEVAROLO, 2010). Geralmente o teor de PC e ABS afeta as propriedades da mistura, para aplicações automotivas o teor de PC utilizado fica entre 60 a 70% e o ABS é responsável pelo menor custo da mistura, quando comparado ao valor de PC (SAEED et al., 2020; MATTOS, DINIZ e FERREIRA, 2018; CANEVAROLO, 2010).

Tanto o PC quanto o ABS são utilizados no setor automotivo há anos, porém, com a utilização de uma mistura PC/ABS obtêm-se um material com boa resistência mecânica, boa resistência à degradação e boa processabilidade, o que é vantajoso para aplicações de alta vida útil, como é o caso do setor automobilístico (SAEED et al., 2020). Atualmente, a mistura PC/ABS tem sido usada na indústria automotiva para fabricar peças de painéis de veículos, logotipos cromados, carcaças internas e coberturas de colunas de direção (MATTOS, DINIZ e FERREIRA, 2018).

Caso seja utilizada a carcaça de PC/ABS, seu descarte pós-consumo pode ocorrer por meio de reciclagem, e para que a reciclagem tenha causado impactos mínimos nas propriedades do material reciclado, podem ser adicionados percentuais de ABS ou PC virgem, ou ainda utilizar outros materiais como BR (borracha de polibutadieno), MBS (estireno-metilmetacrilato) ou elastômeros termoplásticos como SEBS (estireno-etileno-butileno-estireno) que apresenta boa resistência à termodegradação (SCHLUMMER et al., 2016).

Embora seja vantajoso estudar materiais poliméricos na indústria automotiva, é necessária a realização de simulações computacionais e também ensaios de degradação, uma vez que um carro tem vida útil de pelo menos 10 anos e precisa atender requisitos de segurança e estéticos.

Portanto, este trabalho teve como objetivo estudar, por meio de testes mecânicos e simulação computacional, a viabilidade de substituição do cárter automotivo de alumínio por um cárter fabricado com mistura PC/ABS (PULSE™ 2000 EZ). A comparação das propriedades entre o cárter fabricado em alumínio e o cárter fabricado com a mistura PC/ABS foi utilizada para a simulação computacional e realização de ensaios mecânicos (tração, flexão e impacto) antes e após o ensaio de degradação em óleo automotivo.

2. Materiais e métodos

2.1 Materiais

Blenda PULSE™ 2000 EZ (Trinseo) com composição PC/ABS e índice de fluidez 18 g/10 min (260 °C/5,0 kg, ISO 1133), densidade 1,13 g/cm³ (ISO 1183) e temperatura de fusão 240 – 282 °C, com 6% (m/m) de masterbatch preto (Engflex, 017). Para os testes de degradação em óleo sintético automotivo, Mobil Super™ 3000 (D1 5W-30).

2.2 Obtenção dos corpos de prova

A blenda PULSE™ 2000 EZ com 6% (m/m) de masterbatch preto foi previamente seca para 1 hora a 100 (± 5) °C em estufa (Marconi MA035/5/10P). Corpos de prova padrão

ISO I79/1eA e ISO 527 foram obtidos por moldagem por injeção em injetora Battenfeld (SB 1450/400), com temperaturas de 210, 230, 235 e 240 °C.

Antes da realização dos ensaios mecânicos, os corpos de prova foram condicionados de acordo com ASTM D-618, por 40 h a 23 (± 2) °C e umidade relativa de 50 (± 10)%. A espessura dos corpos de prova foi obtida utilizando um micrômetro digital Mitutoyo (543-301) medindo a três pontos de cada corpo de prova.

2.3 Ensaios mecânicos

O ensaio de tração foi realizado em equipamento Instron (5566) de acordo com a norma ISO 527(2019), utilizando 5 corpos de prova com dimensões de (115 x 10 x 4) mm, com 110 mm de separação entre as garras, velocidade de 50 mm/min e célula de carga de 30 kN.

O ensaio de flexão foi realizado em máquina universal Instron (5566), seguindo os requisitos da norma ISO 178, em 5 corpos de prova com dimensões (80 x 10 x 4) mm.

O teste de resistência ao impacto charpy foi realizado de acordo com a norma ISO 179/1eA em 5 corpos de prova com dimensões (80 x 10 x 4) mm previamente entalhados em máquina de escultura motorizada (Ceast) em um ângulo de 46°. O teste foi realizado em um Resil Impactor (6967 - Ceast), foi utilizada a base com distância entre os suportes de 62 mm e um pêndulo de 4 J.

Os ensaios de tração, flexão e resistência ao impacto foram realizados nas amostras antes e após a degradação em óleo automotivo.

2.4 Simulação computacional

O software NX 2.4 (versão 12.0, 2017) foi empregado utilizando a função "Simulação Pré/Pós" com a função 101. Neste trabalho, foi desenvolvido um projeto de cárter para veículos de grande porte, voltado para o mercado de ônibus e caminhões, nos quais é necessário um volume entre 10 e 18 litros de óleo.

Duas simulações computacionais foram realizadas comparando um cárter feito de alumínio com cárter feito de mistura PC/ABS. A primeira simulação comparou o peso do cárter usando a densidade do alumínio (2,7 g/cm³; CALLISTER e RETHWISCH, 2018) e a densidade da mistura PC/ABS (1,14 g/cm³; fornecido pelo fabricante). A segunda simulação teve como objetivo avaliar a aplicação de uma tensão de 1000 N (valor obtido a partir de valores experimentais médios utilizados em montadoras de veículos para testes em cárteres automotivos) nos eixos X, Y e Z, utilizando o valor máximo de tensão obtido no ensaio de tração para a mistura PC/ABS antes da degradação em óleo automotivo e os valores de propriedades mecânicas disponíveis no software para o alumínio.

2.5 Ensaio de degradação em óleo automotivo

Os corpos de prova de tração, impacto e flexão foram submetidos ao ensaio de degradação, onde foram submersos em óleo automotivo Mobil Super™ 3000 (D1 5W30) dentro de um recipiente de vidro transparente fechado com papel alumínio, por 135 dias a uma temperatura de 80 (± 5) °C em estufa (De Leo). O teste de degradação do óleo automotivo foi realizado a 80 (± 5) °C porque é a temperatura média que o óleo automotivo circula dentro do cárter (DYSON, PRIEST e LEE, 2023).

Os corpos de prova foram retirados do óleo e lavados manualmente com detergente neutro, em seguida foram submersos em água destilada por 1 hora com agitação manual a cada 10 minutos para retirada de impurezas e por fim foram secos em estufa (De Leo) a 80 °C por 5 horas. Ensaios de tração, impacto e flexão foram realizados nos corpos de prova degradados seguindo os parâmetros descritos em 2.3.

2.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As imagens de MEV da blenda PC/ABS antes e após a degradação em óleo foram realizadas em um microscópio eletrônico de varredura (FEI Quanta, 250), entre 10 e 15 KV em alto vácuo modo. Os materiais analisados foram recobertos no modo direcional com 20 nm de ouro em equipamento de Sputtering (LEICA ACE 200).

2.7 Análise dinâmica mecânica (DMA)

A análise de DMA foi realizada de acordo com ASTM D4065-20 com corpos de prova com dimensões (1 x 3,8 x 0,4) cm. O analisador dinâmico mecânico DMA Q800 (TA Instruments), foi utilizado, com taxa de aquecimento de 2°C/min, frequência de 1 Hz, faixa de temperatura entre 35 e 160 °C usando o modo de flexão cantilever único.

2.8 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

As medidas de FTIR foram realizadas no modo refletância total atenuada (FTIR-ATR) em um espectrofotômetro Perkin Elmer Frontier, (100 FT-IR) de 4000 a 650 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} e 32 varreduras.

2.9 Impressão 3D de um protótipo de cárter polimérico

Utilizando o desenho 3D do cárter obtido no software NX (2.4), foi realizada a impressão 3D de um protótipo com o auxílio do software Repetier-Host em uma impressora 3D (GTMAX 3D Core A2V2) com filamento ABS premium de 1,75 mm (3D Lab), utilizando o temperatura do bico em 230 °C e temperatura da mesa em 110 °C.

3. Resultado e Discussão

3.1 Aparência visual e MEV das amostras de PC/ABS antes e após o ensaio de degradação em óleo

A Fig. 1 (a) mostra a fotografia dos corpos de prova antes e após o ensaio de degradação em óleo automotivo, onde observa-se que houve perda de brilho e desbotamento após o ensaio de degradação. O resultado obtido está de acordo com o esperado para os processos de degradação sofridos na blenda PC/ABS. Como mencionado, a degradação do ABS pode causar perda de brilho, enquanto a degradação do PC pode levar ao amarelecimento. No entanto, devido à presença do masterbatch preto na formulação, foi possível observar apenas a mudança de brilho e uma perda parcial de cor, conforme discutido por De Paoli (2008) e Ermi et al. (2020).

A perda de brilho em polímeros, especialmente na indústria automotiva, é um fator significativo de qualidade de acabamento veicular. No entanto, o cárter automotivo está situado na parte inferior do veículo e conseqüentemente não afeta negativamente o design veicular.

Um cárter automotivo fabricado em material polimérico estaria sujeito a processos como termodegradação, quimiodegradação, degradação mecânica e stress-cracking. É importante notar que tanto o PC quanto o ABS são suscetíveis à fotodegradação (Ermi et al., 2020). No entanto, os efeitos específicos da fotodegradação não foram avaliados devido à localização do cárter na parte inferior do veículo. Além disso, a análise dos efeitos da degradação mecânica e do stress-cracking não foi realizada devido a limitações técnicas. Sugere-se que esses aspectos sejam abordados em trabalhos futuros para uma compreensão mais completa da durabilidade do cárter automotivo em material polimérico.

A Figura 1 (b) e (c) mostra respectivamente imagens MEV da superfície da mistura PC/ABS antes e após o ensaio de degradação em óleo, observa-se que a superfície após a

degradação (Fig. 1 c) apresenta pequenas ranhuras quando comparado com a superfície antes da degradação (Fig. 1 b). Este resultado corrobora com as fotografias obtidas antes e depois da degradação teste (Fig. 1 a), que indicam que a quimiodegradação ocasionou em ranhuras que diminuem o brilho do material. Destaca-se que embora existam ranhuras, não se observam erosões ou fissuras significativas, o que indica que o processo de degradação iniciou-se, mas não se encontra em uma fase avançada (SCHLUMMER et al., 2016).

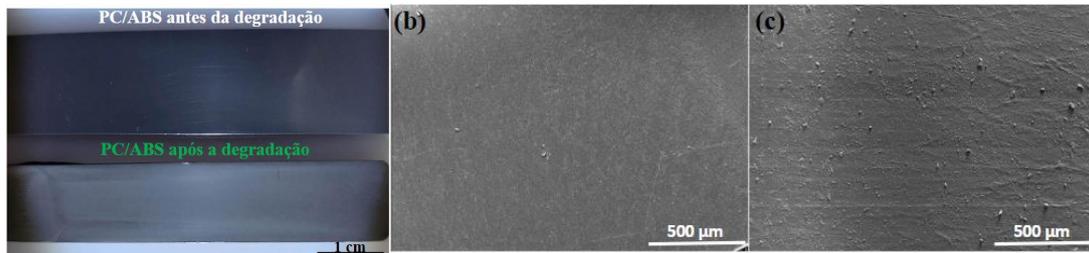


Figura 1 - (a) Fotografia da blenda PC/ABS antes e após teste de degradação em óleo automotivo; Imagens de MEV da blenda PC/ABS (b) antes e (c) após o ensaio de degradação. Fonte: os autores, 2023.

3.2 Propriedades mecânicas (ensaio de tração, ensaio de impacto e ensaio de flexão)

Os resultados dos ensaios mecânicos antes e após o ensaio de degradação são mostrados na Figura 2.

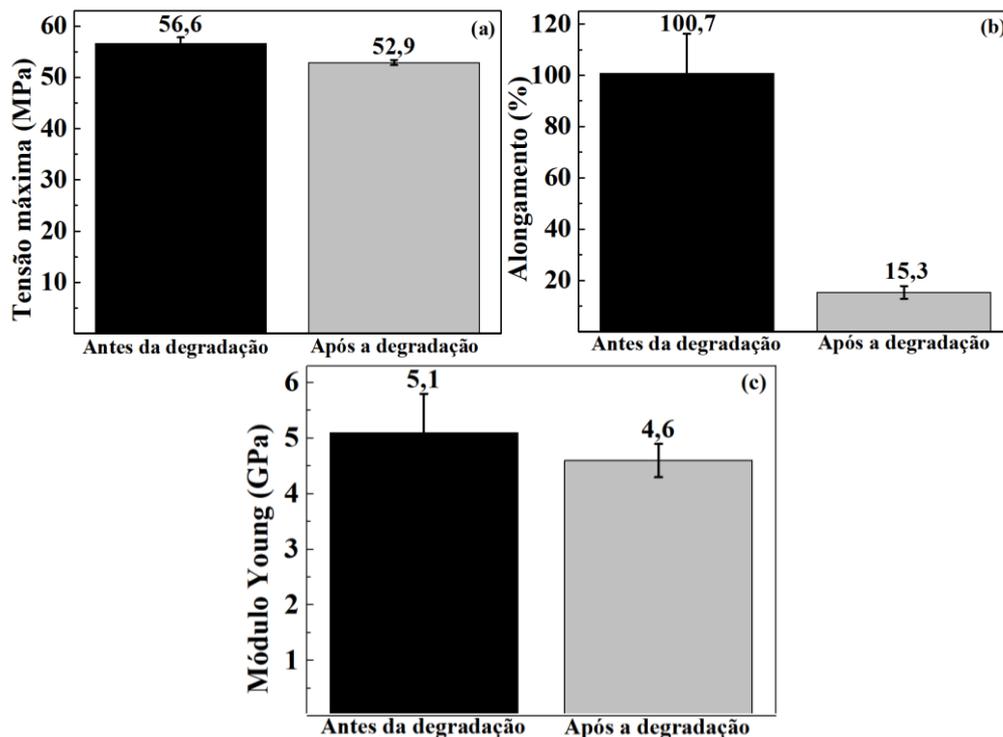


Figura 2 - Resultados dos testes de tração antes e depois da degradação em óleo automotivo (a) tensão máxima (MPa); (b) alongamento na ruptura (%) e (c) módulo de Young para mistura PC/ABS. Fonte: os autores, 2023.

Observando o valor da tensão máxima (Fig. 2 a) nota-se que após o ensaio de degradação em óleo automotivo houve uma diminuição de 6,5% no valor médio de tensão máxima. Para valor do alongamento na ruptura (Fig. 2 b) há uma diminuição significativa de 85% no valor médio obtido após ensaio de degradação em óleo automotivo. Para o módulo de Young (Fig. 2 c) observa-se uma diminuição insignificante no valor, pois a diferença

entre os dois valores médios está dentro do erro do teste, após o teste de degradação em óleo automotivo.

Os resultados do módulo de flexão, mostrados na Figura 3 (a) mostram que os valores foram semelhantes antes e após a degradação em óleo automotivo, pois os valores médios obtidos antes e depois do teste estão dentro do erro de análise.

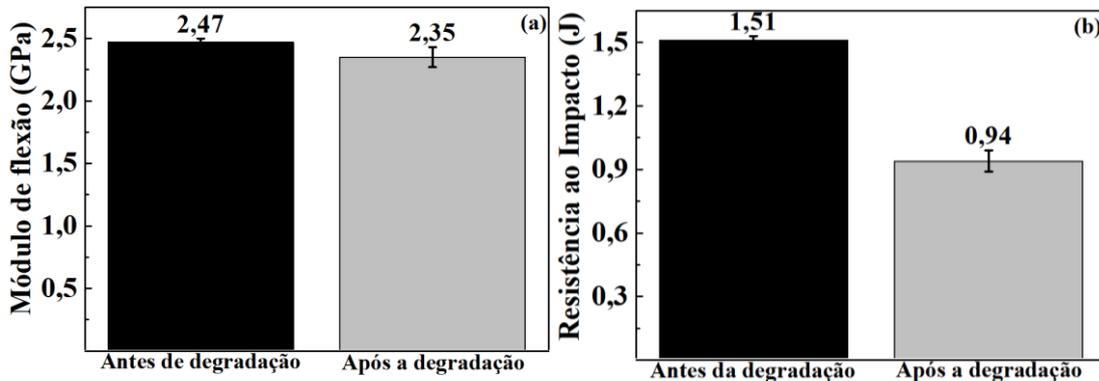


Figura 3 - (a) Resultados de módulo de flexão antes e após a degradação em óleo; (b) Resultados de resistência ao impacto charpy antes e depois da degradação em óleo automotivo para a blenda de PC/ABS.

Na Figura 3 (b), observa-se o valor da resistência ao impacto charpy, onde nota-se que houve uma diminuição de 38% na resistência ao impacto na blenda PC/ABS após a degradação em óleo automotivo.

Os ensaios mecânicos, principalmente o alongamento à ruptura e resistência ao impacto, mostraram uma mudança significativa nas propriedades antes e após o ensaio de degradação em óleo automotivo e que são atribuídas principalmente à presença de butadieno no ABS que é suscetível à degradação por tintas, óleos e óleo de silicone (DE PAOLI, 2008).

O butadieno possui duas ligações duplas na cadeia principal, o que torna os dois carbonos adjacentes as ligações duplas mais suscetíveis à degradação por auto-oxidação. O mecanismo de degradação do butadieno é a formação de ligações cruzadas tornando-o rígido e ocasionando a diminuição na resistência ao impacto e alongamento. Uma alternativa para melhorar a resistência à quimiodegradação do butadieno é o uso do copolímero de acrilonitrila, etileno e estireno, pois com a substituição do butadieno pelo etileno, o efeito da quimiodegradação é reduzido (DE PAOLI, 2008).

A fase PC, neste caso, não é responsável pela quimiodegradação do PC/ABS, uma vez que o PC é degradado quimicamente apenas por ftalatos e álcoois, que não estão presentes em óleo automotivo, enquanto (DE PAOLI, 2008).

O efeito da degradação térmica pode ser aplicado ao PC e ao ABS, porém, neste caso, predominam os efeitos da quimiodegradação causada pelo óleo automotivo.

Outra alternativa para reduzir os efeitos da quimiodegradação e termodegradação na mistura durante o uso é a adição de estabilizantes interativos (antioxidantes primários e secundários), que reagem com radicais livres ou hidroperóxidos e reduzem os efeitos degradativos, ou o uso de estabilizadores redutores que diminuem a velocidade das reações de degradação (DE PAOLI, 2008; MACHADO et al., 2018).

3.3 Simulação Computacional

Usando o software NX, obteve-se um modelo de cárter padrão usado em veículos de grande porte com capacidade máxima de 18 L e área total de 1,2 m². O resultado da análise de simulação de peso para o cárter feito em liga de alumínio foi de 9,0 kg e com a blenda PC/ABS foi de 3,8 kg, portanto o uso da blenda PC/ABS reduziria o peso do cárter em aproximadamente 58%.

A redução do peso do veículo é extremamente vantajosa para um melhor desempenho do veículo redução do consumo de combustível, além de implicar na redução dos gases gerados pela combustão como dióxido de carbono e monóxido de carbono (HEMAIS, 2003). Além da diminuição da densidade, a fabricação de um cárter PC/ABS há uma diminuição nos custos de produção.

A simulação de aplicação da tensão de 1000N nos eixos x, y e z (Fig 4 a, b e c) foi avaliada para o cárter em alumínio e para a blenda de PC/ABS.

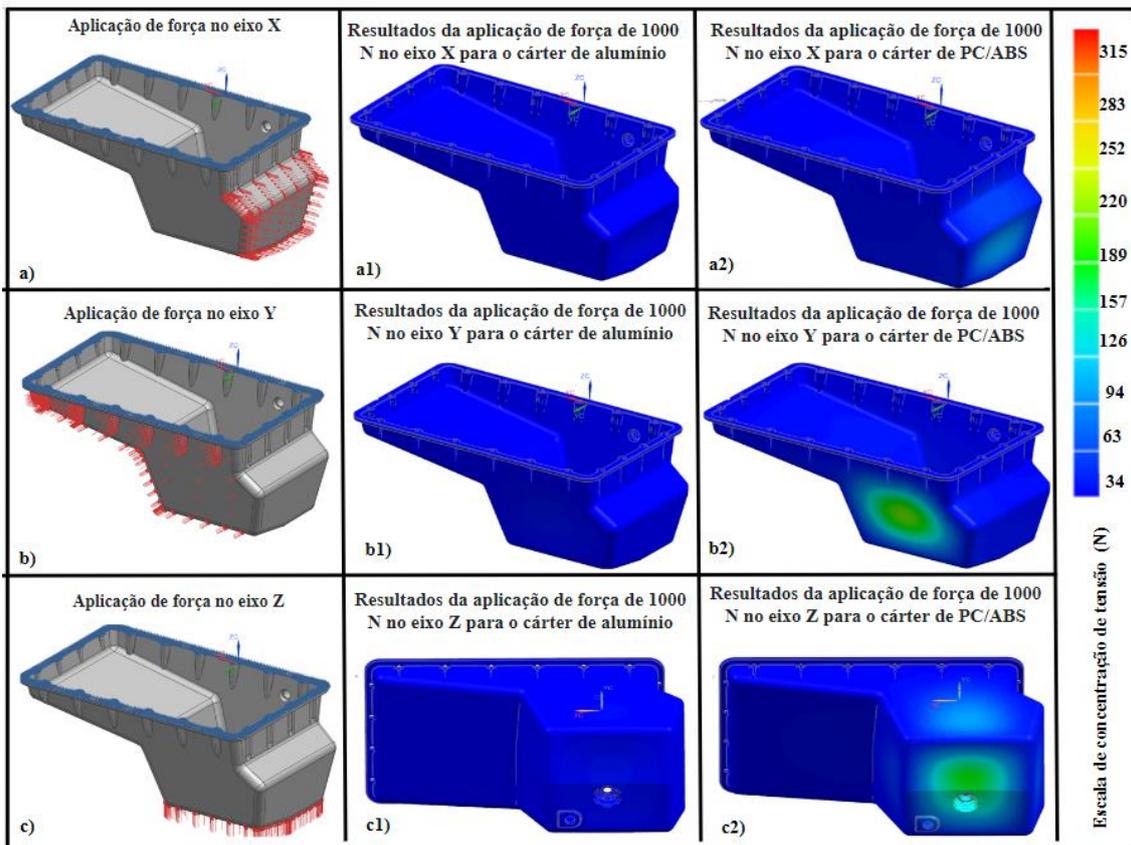


Figura 4. Imagens de simulação computacional do cárter automotivo confeccionado em alumínio e em PC/ABS com aplicação de força de 1000N nos eixos a, a1, a2) X; b, b1, b2) Y; c, c1, c2) Z. Fonte: os autores, 2023.

Analisando as Figuras 4 (a1), (b1) e (c1) quando aplica-se a tensão de 1000 N no cárter de alumínio, não observa-se indicadores de acúmulo de tensão, pois a coloração encontra-se totalmente azul. Por outro lado analisando as Figuras 4 (a2), (b2) e (c2), observa-se que há uma pequena concentração de tensão (tom esverdeado) quando a tensão foi aplicada nos eixos X e Z no cárter de PC/ABS, o que indica um ponto onde existe a possibilidade de apresentar menor resistência.

Portanto, por meio da simulação, observa-se que no cárter de alumínio houve menor concentração de tensão em relação ao cárter de PC/ABS, no entanto, a simulação com o a blenda PC/ABS atenderia aos padrões mínimos exigidos, visto que não houve aparecimento da coloração vermelha, que indicaria ruptura do material com a força aplicada.

Os pontos de concentração de tensão no cárter de PC/ABS podem ser minimizados por meio da otimização da geometria do cárter ou com o aumento da espessura do cárter (CÁCERES, TOPON-VISARREA e CRUZ, 2021).

3.4 Espectros de FTIR-ATR

A Figura 5 (a) e (b) mostra os espectros de FTIR-ATR obtidos para a mistura PC/ABS antes e após o ensaio de degradação em óleo automotivo, mostrando as principais bandas obtidas e que são características do PC e do ABS. Na figura 5 (a), as faixas destacadas no círculo correspondem a bandas entre 3009 e 3100 cm^{-1} referentes à deformação axial de C-H no grupo aromático presente no PC e nas unidades estireno do ABS, para estas bandas não mudanças significativas na intensidade e na forma são observadas nas análises realizadas antes e após degradação em óleo automotivo, o que indica que os grupos aromáticos não sofreram termodegradação e quimidegradação durante o teste. A banda em 2847 cm^{-1} corresponde às vibrações dos carbonos metileno presente no ABS (MATTOS, DINIZ e FERREIRA, 2018; MACHADO et al., 2018).

As bandas localizadas entre 3000 e 2800 cm^{-1} , especialmente a banda mais intensa em 2920 cm^{-1} , referem-se a vibrações de estiramento do C-H dos grupos alifáticos presentes nas unidades de butadieno e acrinonitrila do ABS. Observa-se que após o ensaio de degradação em óleo automotivo a banda em 1920 cm^{-1} torna-se mais intensa quando comparada à banda obtida antes do ensaio de degradação, o que pode ser um indicativo de uma maior incidência de degradação do grupo butadieno, este resultado corrobora a avaliação das propriedades mecânicas obtidas neste trabalho e que foram discutida no item em 3.2 (MATTOS, DINIZ e FERREIRA, 2018; CANEVAROLO, 2010; DAN et al., 2017).

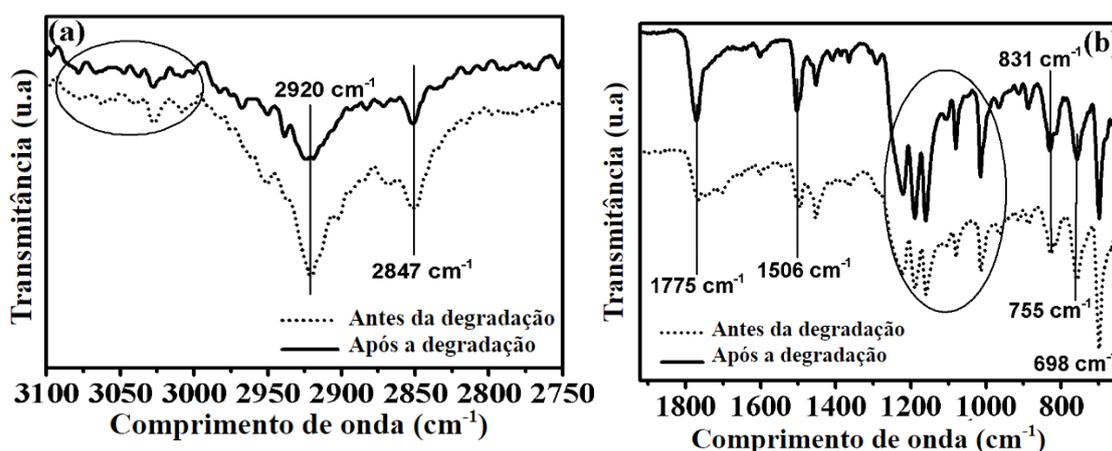


Figura 5. Espectro FTIR-ATR da amostra de PC ABS antes e após o ensaio de manipulação em óleo automotivo mostrado (a) número de onda entre 3100 e 2750 cm^{-1} e (b) número de onda entre 1900 e 650 cm^{-1} . Fonte: os autores, 2023.

Na Figura 5 (b) a banda em 1775 cm^{-1} corresponde à deformação axial dos grupos carbonila ($\text{C}=\text{O}$) do PC, observa-se que esta banda sofre alterações intensidade e formato antes e depois do teste de degradação, esse fato pode ser atribuído formação de grupos oxidados ($\text{C}=\text{O}$) na estrutura do ABS após degradação (MATTOS, DINIZ e FERREIRA, 2018; DAN et al., 2017; CHOI et al., 2022). Dan et al (2017), estudaram a mistura PC/ABS após um ensaio de degradação com radiação UV e relataram resultados semelhantes, indicando que o ABS é mais sensível à degradação quando comparado ao PC (DAN et al., 2017).

A banda em 1506 cm^{-1} corresponde às deformações angulares dos grupos CH e as bandas indicadas com um círculo na Figura 5 (b) correspondem às bandas em 1230, 1164, 1081 e 1015 cm^{-1} que se referem à deformação axial em C-O-C do PC. A banda em 831 cm^{-1} corresponde à deformação angular C-H aromática dos grupos PC e das unidades de estireno do ABS. As bandas em 755 cm^{-1} e 698 cm^{-1} correspondem respectivamente ao ângulo angular deformação dos grupos CH monossubstituídos em ABS e CH aromático

fora do plano de deformação angular em ABS e PC (MATTOS, DINIZ e FERREIRA, 2018; DAN et al., 2017).

As mudanças observadas no perfil das bandas do espectro antes e depois de degradação em óleo automotivo, estão relacionadas principalmente à degradação do ABS, mostrando que a adição de PC, embora mais cara, torna a mistura mais estável (MATTOS, DINIZ e FERREIRA, 2018; DAN et al., 2017; CHOI et al., 2022) principalmente para aplicações automotivas onde as peças precisam de uma vida útil mais longa.

3.6 Análise dinâmica mecânica (DMA)

O gráfico da análise de DMA para a blenda PC/ABS está mostrado na Figura 6, neste trabalho o DMA será utilizado apenas para avaliar a temperatura de transição vítrea (T_g) do material porque outros testes mecânicos já foram realizados. Segundo Sobral, Carvalho e Mendieta-Taboada (2007) que realizaram uma revisão de literatura sobre a análise de DMA (SOBRAL, CARVALHO e MENDIETA-TABOADA, 2007), existem diversas formas de calcular a T_g de um polímero ou blenda, dentre elas, uma pode avaliar os picos da curva de tan Delta versus temperatura ou avaliar a inflexão ponto da curva módulo de armazenamento versus temperatura ($^{\circ}\text{C}$), utilizando as duas metodologias é obtido através da análise de que a T_g da blenda PC/ABS está no intervalo entre 111 e 148 $^{\circ}\text{C}$, este valor está de acordo com o relatado por Schlummer et al (2023) que analisou a T_g obtida a partir de curvas DMA para blendas de PC/r-ABS (ABS reciclado) com 60/40 composição (SCHLUMMER et al., 2016). Conforme relatado na introdução, a temperatura do óleo armazenado dentro do cárter, em condições normais do veículo, está entre 40 e 70 $^{\circ}\text{C}$, mas se houver algum tipo de desregulação no motor, esta temperatura pode atingir entre 90 e 100 $^{\circ}\text{C}$ (DYSON, PRIEST e LEE, 2023), portanto, a mistura poderia ser usada sem problemas relacionados ao amolecimento do cárter no local de trabalho temperatura do óleo do motor.

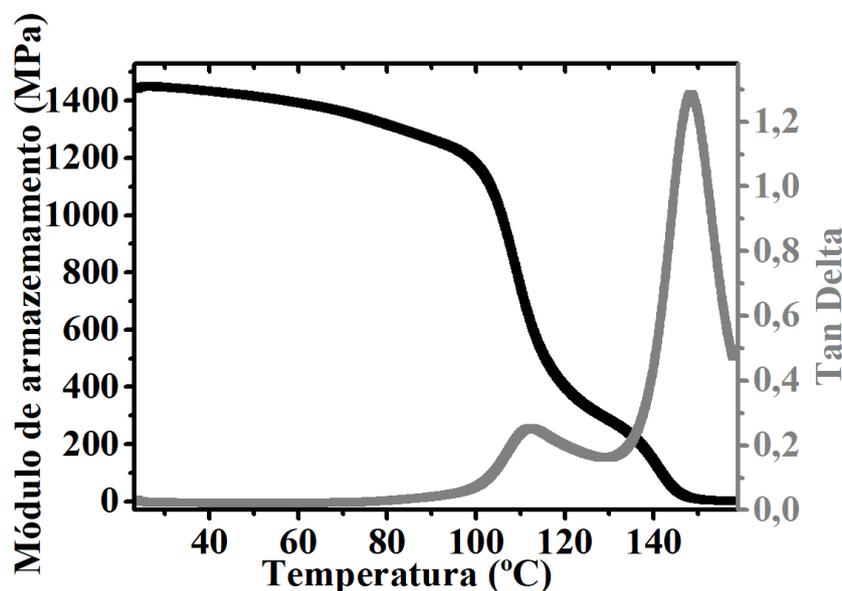


Figura 6. Resultados do ensaio de DMA para a blenda PC/ABS mostrando tan Delta versus temperatura e módulo de armazenamento versus temperatura. Fonte: os autores, 2023.

3.7 Impressão 3D de um protótipo de cárter polimérico

A Figura 7 as fotografias de diferentes perspectivas do cárter obtido por impressão 3D com ABS. Observa-se que foi possível obter um protótipo de cárter feito de material polimérico com bom acabamento. Para a fabricação de um cárter em tamanho real, diferentes tipos de processamento convencional poderia ser usado, incluindo impressão 3D, processamento de injeção ou até mesmo termoformação a vácuo ou rotomoldagem

(GOGOS e TADMOR, 2006) lembrando que o custo da peça dependerá diretamente do tipo de processamento utilizado.



Figura 7. Fotografias da vista superior, inferior e lateral do protótipo do cárter obtido por impressão 3D.
Fonte: os autores, 2023.

4. Conclusão

Neste estudo, foi investigada a viabilidade de fabricação de um cárter automotivo utilizando a blenda PC/ABS. A análise abrangeu ensaios mecânicos, simulação computacional, análise morfológica, DMA e FTIR em corpos de prova de PC/ABS antes e após a exposição ao óleo automotivo, com o objetivo de identificar os tipos de degradação que um cárter hipotético confeccionado de PC/ABS poderia ser submetido durante o uso e seus consequentes efeitos nas propriedades do material. Os ensaios mecânicos de tração, flexão e impacto Charpy, revelaram uma diminuição significativa na ductilidade e resistência ao impacto após a exposição ao óleo automotivo, embora os valores de tensão máxima, módulo de Young e módulo de flexão não tenham sido significativamente afetados. A análise de DMA indicou que a T_g da blenda PC/ABS está entre 111 e 148 °C, superior à faixa de temperatura de operação do óleo do motor (70 - 100 °C). As análises de MEV e fotografias das amostras antes e após o ensaio de degradação revelaram perda de brilho e formação de pequenas ranhuras na superfície após a exposição ao óleo que indica quimiodegradação e termodegradação em estágio inicial. A análise FTIR mostrou as principais bandas características do PC e ABS, destacando que a degradação da mistura é principalmente atribuída ao ABS devido às unidades de butadieno e estireno, mais sensíveis à degradação. A simulação computacional evidenciou pontos de concentração de tensão no cárter sob uma carga de 1000 N nos eixos X, Y e Z, porém, não indicou falhas no cárter quando submetido a essa tensão, o que é um indicativo que o produto pode ser usado, destaca-se que por meio de pequenas modificações na espessura ou otimização do design a diminuição dos pontos de concentração de tensão é promissora. Um protótipo do cárter foi fabricado por impressão 3D, demonstrando a viabilidade de obtenção por processamento simples de um cárter polimérico. Com base nos resultados, considera-se desejável a fabricação de um cárter automotivo com a mistura PC/ABS devido à redução de custos, peso do veículo e potencial para reciclagem, no entanto, recomenda-se estudos adicionais sobre aditivção e degradação sob esforços mecânicos para a aplicação efetiva do produto.

5. Agradecimentos

Fatec Zona Leste – São Paulo, CPE - Empresa de Compostos Plásticos de Engenharia, multiusuário Centro (CEM) da Universidade Federal do ABC e Professora Doutora Márcia Spinacé.

Referências

- DESHMUKH, K.; PATEL, G.M.; BHALIYA, J. & SHAH V.** *Advances in polymeric nanocomposites for automotive applications: A review*. Polymers for Advanced Technologies, Vol. 33, n.10, p. 3023-3047, 2022.
- HEMAIS, A. C.** *Polymers and the automobile industry*. Polymers: Science and Technology Vol. 13, n.2, p. 107-114, 2003.
- CÁCERES, L.; TOPON-VISARREA B. & CRUZ, J.** *Sustainability, Energy and City*. Switzerland: Springer, 2021.
- CALLISTER, W. D. JR. & RETHWISCH, D. G.** *Materials Science and Engineering: an introduction*. 10 ed. United States of America: Wiley, 2018.
- CANEVAROLO, J. S.** *Ciência de Polímeros*. 3 ed. São Paulo: Artliber, 2010.
- CHOI, B-H.; HWANG, J-H.; HYUN, H-C.; CHOI, M-S. & WEE, J-W.** *Observation and Modeling of the Effects of Temperature and UV Lightson Weathering-Induced Degradation of PC/ABS Blend for Sustainable Consumer Electronics*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green, 9(1), 1369-1385, 2022.
- DAN, Y.; LONG-JIANG.; YANG, L. & LI, J.** *FTIR Analysis on Aging Characteristics of ABS/PC Blend Under UV-irradiation in Air*. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy Vol. 184, n.1, p. 361-367, 2017.
- DE PAOLI, M. A.** *Degradação e estabilização de polímeros*. São Paulo: Chemkeys, 2008.
- DYSON, C. J.; PRIEST, M., & LEE, P. M.** *The Flow of Lubricant as a Mist in the Piston Assembly and Crankcase of a Fired Gasoline Engine*. Tribology Letters Vol. 71, n.12, p. 2-16, 2023.
- ERMI, B. D.; SUNG, L-P.; KUVSHINNIKOVA, O. & PICKETT, J. E.** *Accelerated weathering parameters for some aromatic engineering thermoplastics. Part 2: Polycarbonate copolymers, polyarylate and ABS*. Polymer Degradation and Stability Vol. 181, n.1, p. 1-11, 2020.
- GOGOS, C. G. & TADMOR, Z.** *Principles of Polymer Processing*. 2 ed. United States of America: Wiley-Interscience, 2006.
- MACHADO, A. V.; BOTELHO, G.; PIMENTA, A. & SANTOS, R. M.** *Influence of the testing conditions on the efficiency and durability of stabilizers against ABS photooxidation*. Polymer Testing, 32(1), 78-85, 2018.
- MATTOS, E. C.; DINIZ, M. F. & FERREIRA A. C.** *FT-IR methodology (transmission and UATR) to quantify automotive systems*. Polymers Vol. 28, n.1, p. 6-14, 2018.
- SAEED, F.; MAHMOOD, H.; LQBAL, T., RAMZAN, N. & BANO, S.** *Study of thermal degradation behavior and kinetics of ABS/PC blend*. Journal of Chemical Technology, 22(3), 64-69, 2020.
- SCHLUMMER, M.; STROBL, L.; ANWAR, H.; BARRETO, C. & PELTO, J.** *Compatibilized PC/ABS blends from solvent recycled PC and ABS polymers from electronic equipment waste*. Polymer Testing, Vol. 120, n.1, p. 1-10, 2023.
- SOBRAL, P. J.; CARVALHO, R. A. & MENDIETA-TABOADA, O.** *Dynamic-mechanical Analysis: Applications in Edible Films*. New Chemistry Vol. 31, n.2, p. 384-393, 2007.
- SORIANO A. & ANTONIO, J.** *Bloque, culata y cárter del motor de combustión*. Publicaciones Didacticas Vol. 78, n.1, p. 290-294, 2016.