



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE MATERIAIS

ENG 02298 TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO

**REINTEGRAÇÃO DE RESÍDUO DE POLIPROPILENO GERADO PELA
INDÚSTRIA AUTOMOTIVA PARA COMPOSTO TERMOPLÁSTICO EM PARA-
CHOQUES**

Cecília Pelisoli Gafforelli
00208749

Prof^ª. Dr^ª. Ruth Marlene C. Santana

Novembro 2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Marino e Maria Elizabeth, por não medirem esforços para que esse sonho fosse realizado, por não terem me deixado desistir em todas as vezes que achei que não fosse ser capaz e por serem meu abrigo e amparo em todos os momentos de minha vida.

Agradeço a minha irmã, Maína, por ser minha companheira de vida, meu exemplo e inspiração, por sempre acreditar no meu potencial e me incentivar a explorá-lo. A construção deste trabalho é nossa.

Agradeço à professora Ruth Marlene Campomanes Santana por ter acreditado na minha ideia e por ter me guiado até transformá-la em realidade. Por toda sua disposição, boa vontade e interesse em me auxiliar e transmitir conhecimento. Seu apoio e orientação foram fundamentais nessa etapa de minha vida acadêmica.

Agradeço ao Vinícius Cabreira, à Ludmila Araújo, à Cadyne, à Nicolle e a todos os bolsistas do Lapol que me ajudaram direta ou indiretamente em diferentes etapas deste trabalho.

Agradeço ao Núcleo de Sustentabilidade, ao Lapol e à UFRGS pela possibilidade de realizar essa pesquisa contando com seu apoio e infraestrutura.

Agradeço ao SENAI – CETEPO pelas análises, pelo atendimento de qualidade e pronto atendimento a todas as minhas dúvidas.

Agradeço aos funcionários Verzani por terem me ajudado a coletar as tampinhas; ao Douglas Pereira, do shop de Polímeros, pelo auxílio e aprendizado sobre a matéria prima e processo de injeção.

Agradeço à General Motors e à minha liderança por todo incentivo, apoio, compreensão e por terem permitido a realização deste trabalho. Obrigada por me proporcionarem crescimento profissional e pessoal, e por terem se tornado minha segunda casa.

RESUMO

A indústria automobilística tem sido constantemente desafiada a melhorar sua eficiência produtiva. Atitudes como a redução do desperdício e adoção de políticas sustentáveis de crescimento passaram a despertar interesse dos gestores. Seguindo então o princípio da economia circular é atualmente de interesse da indústria, a incorporação de resíduos gerados à matéria prima da fabricação de novos componentes dos veículos, agregando assim valor ambiental e monetário. Nesse sentido, o presente estudo tem por objetivo avaliar a viabilidade da reintegração do resíduo de polipropileno (PP) gerado na indústria automotiva ao ciclo produtivo como componente da matéria-prima utilizada na injeção de para-choques (polipropileno com monômero de etileno-propileno-dieno (PP/EPDM)). Foi realizada a injeção de corpos de prova de compósitos de PP/EPDM/carga com quatro diferentes teores de material reciclado (0, 10, 20 e 30%) em suas composições, para análises de propriedades físicas, térmicas e mecânicas. Os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de caracterização física, mecânica, termomecânica e térmica. Os resultados mais significativos demonstraram que as propriedades obtiveram desempenhos mais satisfatórios com a adição do PP reciclado em todos os teores. O material se tornou mais tenaz, com maior capacidade de absorção de energia ao impacto e, portanto, menos rígido. Através do ensaio de temperatura de deflexão térmica (HDT) foi possível verificar que 30% de teor de PP reciclado tornou o material mais suscetível à temperatura, quando submetido a esforço mecânico restringindo à sua aplicação como para-choque. Sob análise de desempenho *versus* sustentabilidade, limitar a incorporação de teores entre 10% e 20% de material reciclado parece ser o mais indicado. Assim sendo, é possível reintegrar resíduo de polipropileno ao ciclo produtivo de veículos, através de seu uso na matéria prima utilizada no processo de injeção de para-choques.

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 6 |
| 2 OBJETIVOS | 8 |
| 2.1 Objetivo Geral..... | 8 |
| 2.2 Objetivos Específicos | 8 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 9 |
| 3.1 Para-choques | 9 |
| 3.1.2 Materiais Utilizados em Para-choques..... | 10 |
| 3.1.2.1 Polipropileno..... | 12 |
| 3.1.2.1.1 Talco | 14 |
| 3.1.2.2 Tenacificação de Polímeros por Modificadores de Impacto | 15 |
| 3.1.2.2.1 Deformação por Microfibrilamento (<i>crazing</i>) | 17 |
| 3.1.2.2.2 Deformação por Escoamento por Cisalhamento (<i>shear banding</i>) | 18 |
| 3.1.2.2.3 Tenacificação de Polipropileno com Monômero de Etileno- Propileno-Dieno | 20 |
| 3.2 Reciclagem de Polipropileno | 21 |
| 3.2.1 Economia Circular..... | 24 |
| 4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL | 26 |
| 4.1 Materiais | 26 |
| 4.2 Métodos..... | 27 |
| 4.2.1 Formulação dos corpos de prova..... | 28 |
| 4.2.2 Injeção dos corpos de prova | 29 |
| 4.3 Caracterização do resíduo e dos corpos de prova | 30 |
| 4.3.1 Densidade..... | 30 |
| 4.3.2 Ensaio Mecânico de Tração..... | 31 |
| 4.3.3 Ensaio Mecânico de Flexão | 31 |
| 4.3.4 Ensaio Mecânico de Impacto Charpy e Izod..... | 32 |

| | |
|---|----|
| 4.3.6 Temperatura de Deflexão (HDT)..... | 32 |
| 4.3.7 Termogravimetria (TGA) | 32 |
| 4.3.8 Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC) | 33 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 34 |
| 5.1 Análise da Densidade dos Corpos de Prova | 34 |
| 5.2 Propriedades Mecânicas de Tração dos Compostos | 35 |
| 5.3 Propriedades Mecânicas de Flexão dos Compostos..... | 39 |
| 5.4 Impacto Charpy e Izod..... | 41 |
| 5.5 Temperatura de Deflexão (HDT) | 44 |
| 5.6 Análise dos Resultados do Ensaio de Termogravimetria (TGA)..... | 45 |
| 5.7 Ensaio de Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC)..... | 47 |
| 6 CONCLUSÕES | 49 |
| 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 50 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 51 |

1 INTRODUÇÃO

A indústria automobilística é desafiada a sofrer constantes evoluções tecnológicas para melhorar sua eficiência produtiva, manter seu alto padrão de qualidade e produzir cada vez mais com investimentos financeiros que garantam sua competitividade no mercado. Com isso, oportunidades surgem para que estudos sejam desenvolvidos e explorem possíveis soluções criativas e inovadoras para identificar, reduzir e eliminar pontos de desperdício, e acelerar os processos produtivos.

O crescimento no número de veículos produzidos tem participação considerável no consumo de recursos energéticos, emissões e descartes de resíduos. No Brasil, de acordo com a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA), 2,880 milhões de automóveis foram produzidos no ano de 2018, e estima-se que em 2019 esse número chegue a 2,940 milhões (REVISTA VEJA, 2019).

O setor automotivo foi responsável pelo consumo de 7,2% de transformados plásticos em 2016, perdendo apenas para os setores de alimentação e construção civil. Neste mesmo ano, o Brasil produziu 6,4 milhões de toneladas de resinas termoplásticas e 6,0 milhões de toneladas de transformados plásticos, mas teve apenas 550 mil toneladas de plástico pós-consumo recicladas (ABIPLAST, 2017 e ABIPLAST, 2018). Em 2030, estima-se que o percentual de materiais plásticos nos automóveis será de 25 a 30% (FOLHA DE SÃO PAULO, 2013).

Dentre outros motivos, o uso expressivo de polímeros na fabricação de veículos se deve à massa das peças ser muito menor do que as similares em outros materiais, o que possibilita maior economia de combustível (ORTH *et al*, 2014).

Desde 2010 está em vigência a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pelo Ministério do Meio Ambiente, que prevê aos geradores de resíduos a responsabilidade de prevenir, reduzir, reciclar, reutilizar e destinar corretamente seus rejeitos. Tal política também cobra protagonismo ambiental da sociedade, e

principalmente das indústrias, para que a produtividade acompanhe limites sustentáveis de crescimento (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2019).

Outro incentivo criado pelo governo que estimula a indústria automobilística é o Programa Rota 2030, que foi aprovado no final de 2018, em substituição ao Programa Inovar-Auto. O novo programa busca incentivar que as empresas cumpram metas de eficiência energética, segurança e financiamento à pesquisa, desenvolvimento e engenharia. O benefício retornará em deduções do imposto de renda relativas ao valor investido pela empresa (no caso de P&D) e reduções na alíquota do imposto sobre produto industrializado (IPI), no caso das metas de eficiência e segurança atingidas (MINISTÉRIO DA ECONOMIA, INDÚSTRIA, COMERCIO EXTERIOR E SERVIÇOS, 2019). A associação dos dois programas pode fazer com que a indústria busque em seus próprios processos soluções para reaproveitar recursos e resíduos para aprimorar propriedades e baixar custos de peças para a montagem dos veículos.

Seguindo o princípio da economia circular, a ideia é manter os recursos investidos pelo maior tempo possível dentro do ciclo produtivo, para extrair o valor máximo deles durante o uso, e recuperar materiais e produtos no final de cada vida útil.

Utilizar um resíduo gerado pela própria indústria como parte da matéria prima para fabricar um componente novo que será utilizado no ciclo de montagem de veículos, gera economia de recursos em matéria prima virgem, agrega valor ambiental e monetário e enobrece um material que seria descartado e revendido por valores irrisórios.

Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar a possibilidade de reintegração de resíduo de polipropileno, gerado pela indústria automotiva, ao ciclo produtivo de veículos, através de seu uso na matéria prima utilizada no processo de injeção de para-choques.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a possibilidade de reintegração de resíduo de polipropileno, gerado pela indústria automotiva, ao ciclo produtivo de veículos, através de seu uso na matéria prima utilizada no processo de injeção de para-choques.

2.2 Objetivos Específicos

- Correlacionar as propriedades térmicas e mecânicas de corpos de prova do material virgem com os resultados obtidos de corpos de prova de composição contendo 10%, 20% e 30% de material reciclado.
- Determinar o teor ótimo de resíduo de polipropileno na matéria prima do para-choque.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o passar dos anos, exigências em segurança e eficiência energética forçaram a indústria automobilista a buscar inovações e soluções tecnológicas para cumprir com regulamentações.

Matérias primas metálicas foram largamente substituídas pelas poliméricas em componentes veiculares como painéis de instrumentos, molduras de portas, grades de radiadores, componentes de motores e para-choques. A participação de material plástico na massa total dos veículos aumentou de 75 kg para 450 kg (INÁCIO, 2017). A figura 1 ilustra a presença dos polímeros nos componentes internos e externos dos automóveis.

Figura 1 – Participação dos polímeros nos componentes veiculares.



(Fonte: Inácio, 2017)

No caso dos para-choques, essa transição de matéria prima foi acompanhada de ressignificação da sua utilização nos veículos, deixando de ser um adereço e tornando-se um elemento de segurança.

3.1 Para-choques

Para-choques possuem a função de reduzir e prevenir os danos físicos que podem ser causados por colisões à baixa velocidade às partes traseira e dianteira

dos carros de passeio, através da absorção de energia do choque sofrido (NHTSA, 2019).

Eles são peças de segurança que não atuam na proteção direta dos ocupantes do veículo. Servem para proteger os faróis, lanternas, luzes de estacionamento, assim como os sistemas de exaustão e resfriamento, combustível, grades, capô e portamalas (PRABHAKARAM, 2012).

Quando os para-choques surgiram, eram apenas uma barra metálica presa na dianteira e traseira dos veículos e possuíam apenas fins estéticos.

Até 1959 as estruturas dos veículos eram rígidas, pois acreditavam ser as mais seguras quando na verdade, eram as mais prejudiciais por deixarem a força de impacto da batida atingirem o interior do carro e os passageiros. A partir desta constatação, foram criadas as estruturas “*crumple zones*”, tradução livre para “zonas de deformação”, localizadas nas partes dianteira e traseira dos veículos e que permitem a absorção da energia da colisão impedindo que atinja os ocupantes (AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL, 2019).

Tal avanço permitiu que novos materiais fossem estudados para aplicações automobilísticas de absorção de impacto, mais especialmente, os polímeros.

Além das boas propriedades de absorção de impacto, outros fatores influenciaram a maior utilização dos polímeros na produção de veículos, como economias em custo, montagem e peso.

3.1.2 Materiais Utilizados em Para-choques

A seleção de materiais para aplicação automotiva deve seguir três critérios principais: boa relação custo-benefício, baixa massa e resistência ao impacto. A estrutura dos para-choques costumava ser extensivamente composta por materiais metálicos, devido à alta rigidez e resistência mecânica. No entanto, a demanda considerável por leveza, para que haja menor consumo de combustível (75% do consumo de combustível está relacionado à massa do veículo (KIM, 2019), levou os engenheiros a substituírem os metais por polímeros reforçados, principalmente, os reforçados com fibras, que trouxeram propriedades superiores a um custo mais baixo (HASSAN, 2018).

Os para-choques são expostos às mais variadas condições climáticas, portanto deve ser considerado a capacidade do material em resistir à corrosão, à absorção de água (JOHN *et al*, 2014), à incidência de radiação UV e à deformação em diferentes faixas de temperatura.

Atualmente, a indústria utiliza como matéria prima para o para-choques resinas primárias como: polipropileno, poliéster, olefinas termoplásticas, policarbonato, poliamida e poliuretano. Reforços são adicionados para permitir que o material seja o mais resistente possível ao impacto (AUTOMOTIVE PLASTICS, 2019).

Muitos estudos encontrados referem-se a polímeros reforçados com fibras, tanto sintéticas quanto naturais: polipropileno com fibra de vidro (KIM, 2019), resina epóxi com fibra de OPEFB (*oil palm empty fruit bunch*) (HASSAN, 2018) e resina epóxi com fibra de vidro (PRABHAKARAN, 2012).

De acordo com (JOHN *et al*, 2014), os compósitos mais utilizados são: resina epóxi reforçada com fibra de carbono, resina epóxi reforçada com fibra de vidro, polipropileno reforçado com fibra de carbono, vinil éster reforçado fibra de vidro e poliéster reforçado com fibra de vidro.

Também foram encontrados estudos que utilizaram polímeros reciclados como parte da matéria prima: compósitos de sisal com polipropileno oriundo de para-choques descartados (NAUSHAD, 2014), polipropileno reciclado incorporado ao PP/EPDM (FERNANDES, 2007) (SILVA, 2013) (SANTOS, 2013) PP/EPDM reciclado reforçado com fibra de bambu (INÁCIO, 2017).

Além dos compósitos, os termoplásticos olefínicos (TPOs) também são muito utilizados pela indústria automotiva, substituindo termoplásticos de engenharia tradicionais devido ao desempenho das propriedades, flexibilidade de formulação e baixo custo. Aplicações automotivas internas e externas incluem painéis, para-lamas, *spoilers*, molduras laterais, aerofólios e para-choques (MAIER E CALAFUT, 1998).

Dependendo do tipo de reforço que o material possui, ele pode ser facilmente reciclado. No caso de TPOs, o resíduo pós-industrial pode funcionar, em muitos aspectos, como resina virgem. Isso reduz o custo com matéria prima para produção e reduz a pegada ambiental da indústria (AUTOMOTIVE PLASTICS, 2019).

3.1.2.1 Polipropileno

O polipropileno (PP) é um polímero termoplástico semicristalino sintetizado por polimerização do propileno, um monômero derivado de produtos do petróleo, em condições específicas de temperatura e pressão e com uso de um catalisador, a reação está representada pela figura 2 (HARPER E PETRIE, 2003). Através de um catalisador estereoespecífico (catalisador de Ziegler), Natta tornou a reação comercialmente viável, pois possibilitou a formação de estruturas regulares, através do controle da orientação do grupo metila (CH₃) na cadeia polimérica (SANTANA, 2014).

Figura 2 – Reação de obtenção do polipropileno (PP).



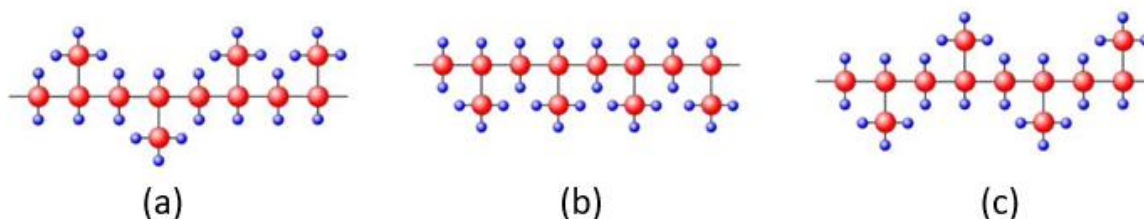
(Fonte: Harper e Petrie, 2003)

A estrutura do PP pode ser do tipo atática, isotática ou sindiotática.

- Atática não tem regularidade na disposição do grupo metila, estrutura é praticamente amorfa, figura 3a.
- Isotática tem todos os grupos metila do mesmo lado e no mesmo plano da cadeia polimérica, figura 3b.
- Sindiotática tem os grupos metila dispostos alternadamente, acima e abaixo, do plano da cadeia, figura 3c.

Por causa da regularidade dos arranjos das estruturas isotáticas e sindiotáticas, elas apresentam maior cristalinidade (DA CUNHA, 2010).

Figura 3 – Estruturas químicas do polipropileno (PP), (a) atática, (b) isotática e (c) sindiotática.

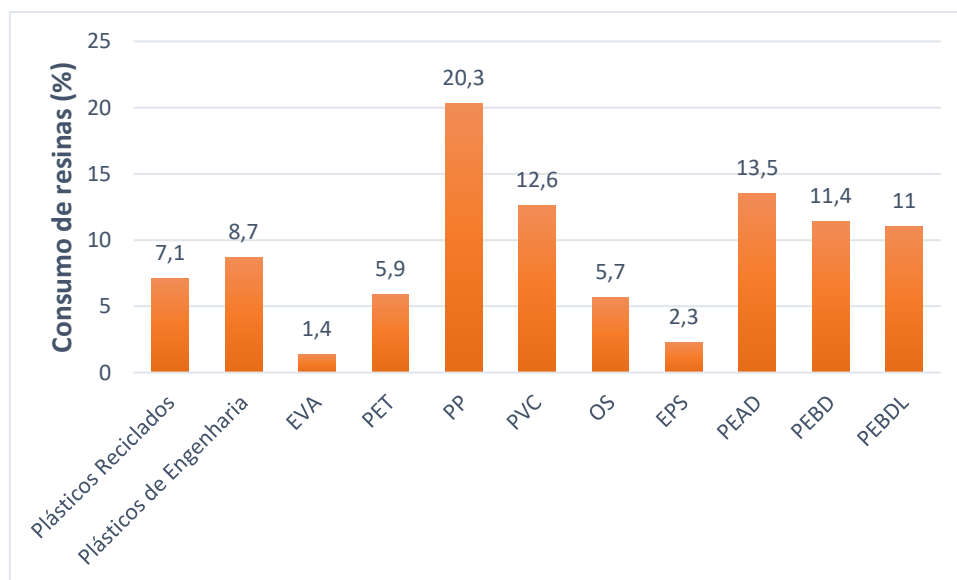


(Fonte: da Cunha, 2010)

O PP acabou se tornando o mais popular entre os plásticos *commodities* por apresentar um conjunto de propriedades vantajosas com relação aos demais termoplásticos, dentre elas estão: baixa densidade, equilíbrio de rigidez e resistência mecânica, resistência química e térmica, fácil processamento, reciclabilidade e bom custo-benefício. Esse polímero pode ser processado por diversos métodos tais como extrusão, injeção, sopro, rotomoldagem, compactação e termoformagem (GOSHAL *et al*, 2016).

De acordo com a Pesquisa Industrial Anual de 2016 realizada pelo IBGE, o polipropileno foi a resina mais consumida no Brasil, com 20,3%, mostrando sua alta popularidade frente aos outros polímeros.

Figura 4 – Principais resinas consumidas no Brasil (%) no ano de 2016.



(Fonte: Adaptado de ABIPLAST, 2018)

O polipropileno possui algumas desvantagens quando comparado a outras resinas que fazem parte do mercado de transformação como o HIPS, PVC e ABS, que são: maior coeficiente de expansão térmica e menor resistência ao impacto, em particular em baixas temperaturas, maior fator de contração após processo de injeção, baixa resistência à radiação UV, baixa resistência oxidativa na presença de determinados metais como o cobre, e por se tratar de material semicristalino sofre de elevada fluência (TRIPATHI, 2002).

Para contornar suas desvantagens e utilizá-lo como polímero de engenharia, faz-se necessário o uso de aditivos modificadores, que alteram as propriedades do material para que possa atender às solicitações de determinada aplicação. Um exemplo de modificação, é a adição de modificadores de impacto, que são elastômeros incorporados ao polipropileno para torná-lo mais tenaz e capaz de ser aplicado em peças automobilísticas.

3.1.2.1.1 Talco

O talco puro é um hidrato de silicato de magnésio, $Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$, utilizado há milhares de anos para fins cosméticos e como matéria-prima para esculturas. Sua estrutura permite que seja inerte a maioria dos ácidos e reagentes químicos, com estabilidade térmica até, aproximadamente, 900°C e não afetado pelas condições de processamento (INÁCIO, 2017).

Por causa da hidrofobicidade da superfície de suas partículas, o talco possui alta compatibilidade com substâncias orgânicas como ceras, óleos e polímeros. Isso possibilitou sua utilização como carga de reforço ou enchimento em materiais poliméricos.

Muitas propriedades são afetadas positivamente pela característica de carga de reforço que o talco apresenta. Algumas delas são: rigidez, temperatura de deflexão térmica (HDT), fluência, contração e coeficiente de expansão térmica linear. Porém, o talco também apresenta efeitos adversos nas propriedades de resistência UV, alongamento na ruptura, tenacidade, resistência da linha de solda e envelhecimento térmico a longo prazo (ZWEIFEL, 2009).

Grande parte do talco utilizado em polímeros está presente em compostos de polipropileno para a indústria automotiva, pois é possível obter qualquer característica

desejada combinando escolhas de carga, matriz, quantidade de elastômero, agentes de acoplamento e outros aditivos.

O polipropileno sem carga é, consideravelmente, afetado pela temperatura, apresenta baixa tolerância dimensional e baixa deformação. Com adição de talco em sua composição, o polipropileno passa a ter melhores tolerâncias à pós-moldagem e deformações menores, porque a carga ajuda a reduzir a retração do material.

A tabela 1 mostra a influência de 40% de talco na composição do PP, com queda de tenacidade e aumento de rigidez, através do módulo de flexão. Aplicações que exigem baixo custo, maior rigidez, boa estabilidade dimensional e boa temperatura de deflexão ao calor são recomendadas para a utilização dos *grades* com carga de talco (BIRLEY, 1988).

Tabela 1 – Propriedades do polipropileno com e sem carga de 40% de talco.

| Propriedade | PP sem carga | PP com 40% de talco |
|-------------------------------|---------------------|----------------------------|
| Módulo de Flexão (GPa) | 1,38 | 3,55 |
| Impacto Izod (J/m) | 133 | 48 |

(Fonte: adaptado de Birley, 1988)

3.1.2.2 Tenacificação de Polímeros por Modificadores de Impacto

A introdução de aditivos aos polímeros é baseada em dois aspectos: o primeiro é a necessidade de alterar propriedades do material, para que possa atender às solicitações de determinada aplicação, por exemplo, torná-lo mais tenaz ou mais rígido. O segundo aspecto é tornar o material mais estável durante seu processamento ou durante seu tempo de vida útil, por exemplo, o uso de aditivos lubrificantes e antiestáticos (RABELLO, 2000).

Assim, os aditivos podem ser divididos em duas categorias gerais:

- Aditivos modificadores
- Aditivos protetores

Neste trabalho trataremos apenas dos aditivos modificadores, dentre eles os aditivos modificadores de impacto, também chamados de tenacificantes.

A baixa resistência ao impacto de polímeros vítreos ou semi-cristalinos é resultado da baixa mobilidade molecular que não permite a dissipação da energia aplicada durante uma solicitação mecânica, através dos mecanismos de deformação. A tensão aplicada é concentrada quando existem vazios, inclusões ou falhas internas causando a propagação rápida das trincas até a ruptura do material. A adição de modificadores de impacto proporciona a criação de mecanismos de deformação que possibilitam a dissipação da energia, evitando que contribua para alastrar falhas e trincas (RABELLO, 2013).

Os termoplásticos modificados com elastômero são materiais de estrutura heterofásica que compreende uma fase de matriz rígida e uma fase dispersa elastomérica. Elastômeros são caracterizados por uma cadeia polimérica flexível que apresenta baixa temperatura de transição vítrea (T_g). Um polímero modificado por elastômero é quebradiço abaixo da temperatura de transição vítrea da borracha, mas mostra vários graus de resistência a temperaturas mais altas dependendo da composição, do tamanho, da distribuição e estrutura das partículas de elastômero. O módulo de uma borracha é cerca de três ordens de magnitude inferior ao de um polímero vítreo à temperatura ambiente. Para obter polímeros tenazes, essa grande diferença nos módulos é essencial (KESKKULA, 2000).

A adição dos modificadores acontece com a incorporação de partículas de elastômero com baixa miscibilidade com o polímero da matriz através de mistura mecânica ou polimerização do polímero vítreo na presença do componente elastomérico, obtendo-se um copolímero do tipo enxertado (*grafting*) (RABELLO, 2000).

Existem três condições essenciais para obter uma mistura com alta resistência ao impacto:

- O componente elastomérico deve ter temperatura vítrea (T_g) bem abaixo da temperatura ambiente.
- Deve haver baixa miscibilidade entre matriz e elastômero, para que haja formação de segunda fase elastomérica dispersa na matriz vítrea.
- É necessária boa adesão entre as fases.

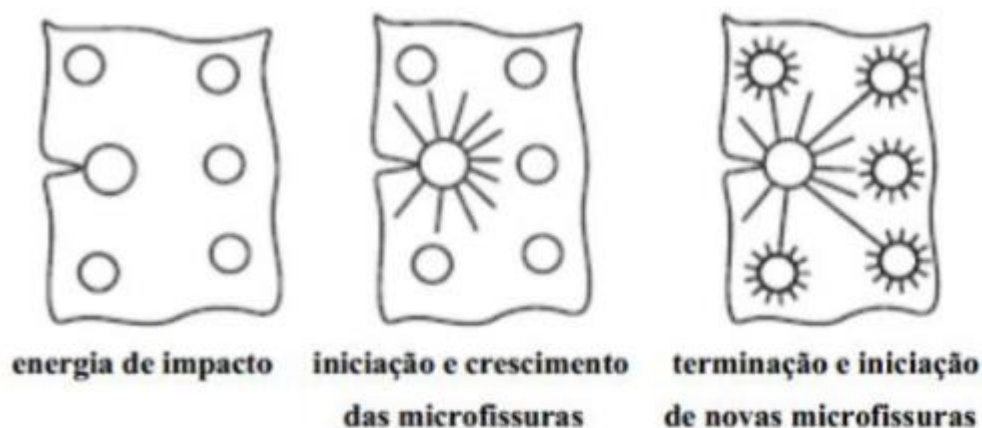
A presença da fase elastomérica permite que ocorra mecanismos de deformação que podem ser por microfibrilamento (*crazing*) ou escoamento por cisalhamento (*shear banding*).

3.1.2.2.1 Deformação por Microfibrilamento (*crazing*)

Microfissuras surgem a partir de defeitos internos ou superficiais durante a deformação de polímeros vítreos. Elas são constituídas por 50% de vazios e 50% de polímero altamente orientado, sendo chamadas de microfibrilações.

As microfibrilas apresentam aspecto macroscópico com o aparecimento de riscos finos que se propagam em um plano perpendicular ao da tensão aplicada, elevando a energia de fratura do material. O microfibrilamento pode ser induzido ao redor das partículas elastoméricas adicionadas a um polímero frágil. As partículas elastoméricas geram distribuição de tensões e consequente dissipação da energia aplicada antes de gerar trincas catastróficas. Assim, há interrupção e reinício do crescimento da fissura, quando esta encontra outra partícula de elastômero, como mostra a figura 5 (FARIA, 2008).

Figura 5 – Mecanismo de deformação por microfibrilamento de um polímero tenacificado com partículas de elastômero.



(Fonte: Faria, 2008)

Acredita-se que o mecanismo de formação das microfibrilações envolva três etapas básicas:

- Aumento nas tensões laterais causado pela deformação plástica por cisalhamento ao redor do defeito concentrador de tensão.
- Alívio das tensões triaxiais, através da nucleação de vazios.
- Crescimento dos vazios e estiramento dos ligamentos poliméricos em suas vizinhanças.

Entretanto, o mecanismo de deformação por microfibrilamento não contribui de modo suficiente para uma alta tenacidade em polímeros vítreos, pois a concentração de tensões na região do microfibrilamento provoca o rompimento das fibrilas, que origina a formação rápida de trincas que fragilizam o material. A massa molecular do polímero influencia a formação de microfibrilações estáveis (RABELLO,2000).

3.1.2.2.2 Deformação por Escoamento por Cisalhamento (*shear banding*)

Quando a tensão para formação das microfibrilações for mais alta do que a tensão de escoamento do material, ocorrerá deformação por cisalhamento. O polímero poderá se deformar através dos dois mecanismos, se as duas tensões apresentarem valores semelhantes.

O modificador de impacto cria mais zonas de escoamento no material, deixando-o com energia de fratura mais alta do que quando estava sem modificador.

Neste mecanismo, ocorre deslizamento dos segmentos de cadeias umas sobre as outras como resposta a tensão de cisalhamento aplicada, esta ação causa mudança no formato sem variar o volume, assim sem gerar vazios típicos do mecanismo de microfibrilamento (INÁCIO, 2017).

A deformação pelo mecanismo de cisalhamento evita a formação de trincas, por possibilitar a dissipação de tensão por meio de fluxo localizado, sendo menos danoso ao material. Não há variação de densidade durante a deformação (não é dilatacional) como ocorre no microfibrilamento.

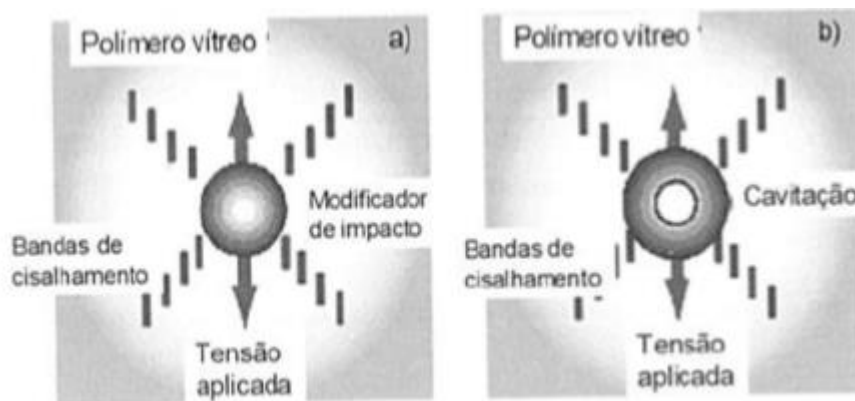
A deformação por cisalhamento provoca o embranquecimento dos polímeros, causado pela cavitação (criação de vazios) das partículas de borracha antes do escoamento. Esse processo ocorre em três etapas conforme ilustrado na figura 6, que são:

a) Ocorre dilatação da matriz e deformação triaxial das partículas elastoméricas causada por concentração de tensões na interface entre partículas e matriz. Foi observado a ocorrência de deformação plástica localizada em decorrência do alongamento das partículas juntamente com a matriz.

b) Inicia-se a formação de vazios através de cavitação dentro das partículas, causada pela concentração de tensão que aumenta a pressão hidrostática no interior das partículas.

c) Inicia-se a deformação por cisalhamento. A formação de vazios auxilia a dissipação da tensão triaxial gerada, e após a cavitação ocorre diminuição local da tensão axial e a resistência ao escoamento diminui (RABELLO, 2013).

Figura 6 – Etapas (a) e (b) do processo de deformação por cisalhamento.



(Fonte: Rabello, 2013)

A tenacidade é afetada diretamente pelo tamanho de partícula do modificador. Existe um tamanho crítico que depende da combinação polímero-modificador e da sua concentração. Acima do tamanho crítico, o material apresenta fragilidade.

Muitas vezes ocorre a combinação dos dois mecanismos de deformação em um material, ocorrendo efeito sinérgico entre elas e provocando elevada tenacidade. As bandas de cisalhamento desempenham o papel de barreiras para a propagação de microfibrilações e formação de trincas catastróficas (RABELLO, 2000).

3.1.2.2.3 Tenacificação de Polipropileno com Monômero de Etileno-Propileno-Dieno

Para tenacificação do polipropileno, os principais modificadores utilizados são as borrachas EPM (monômero de etileno-propileno) e EPDM (monômero de etileno-propileno-dieno) através de misturas mecânicas.

A introdução dos elastômeros à base de etileno permitiu a melhora da tenacidade do PP a baixas temperaturas (KESKKULA, 2000). A fase elastomérica de EPDM na matriz de polipropileno tem como objetivo alcançar o balanço adequado entre rigidez, resistência mecânica e resistência ao impacto (SILVA, 2013).

Termoplásticos olefínicos (TPOs) são as blendas resultantes da união de PP/EPDM. Geralmente, apresentam teores elastoméricos acima de 20%. Sua morfologia é constituída por partículas de elastômero dispersas na matriz de polipropileno (MAIER E CALAFUT, 1998).

TPOs podem apresentar características rígidas ou flexíveis, dependendo de sua composição. Eles conseguem permanecer dúcteis em temperaturas negativas sob impacto. A tabela 2 mostra os valores de algumas propriedades comparados entre os diferentes tipos de polipropileno. Os resultados de resistência ao impacto (tanto a 23°C quanto a -34°C) dos dois polipropilenos modificados com elastômero com e sem talco foram muito superiores ao valor do PP homopolímero (INÁCIO, 2017).

Tabela 2 – Comparação de algumas propriedades dos diferentes tipos de polipropileno.

| Propriedade mecânica | PP homo | PP com 20% talco | PP com 20% fibra de vidro | PP copolímero em bloco | PP copolímero randômico | PP com elastômero | PP com elastômero e 20% talco |
|--|---------|------------------|---------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------------|
| RI Charpy c/ entalhe a 23°C, kJ/m ² | 3 | 4 | 9 | 9 | 20 | 65 | 50 |
| RI Charpy c/ entalhe a 30°C, kJ/m ² | 1,5 | - | - | 4,5 | 2,5 | 8 | 6 |
| HDT (1,8 MPa), °C | 55 | 70 | 130 | 55 | 45 | 50 | 50 |

(Fonte: adaptado de Inácio, 2017)

Muitos estudos foram conduzidos para verificarem os efeitos da adição de EPDM ao polipropileno.

Clemons (2010) observou que a presença do EPDM aumenta a energia de impacto absorvida e a deformação, e reduz o valor do módulo. Também demonstraram, através dos picos de relaxação da transição da fase vítrea do EPDM e da região amorfa do PP, a imiscibilidade da blenda PP/EPDM.

Pigatto (2009) verificou que o EPDM na composição do PP eleva a resistência ao impacto, influencia no índice de fluidez e reduz o módulo de armazenamento.

Os resultados de Silva *et al* (1995) mostraram que o módulo de Young e o limite de resistência na carga máxima diminuem, enquanto os valores de alongamento na ruptura e energia absorvida no impacto aumentaram, com o acréscimo no teor de EPDM. Acima da relação de 30/70 para EPDM/PP ocorreu a diminuição da resistência e da rigidez. A elevação da temperatura de mistura resultou em queda das propriedades mecânicas. O aumento da temperatura associado à força de cisalhamento elevada causou maior degradação ao polipropileno, que, quando degradado, apresenta redução do número de cadeias longas, que diminuem o alongamento do material, e, conseqüentemente, a resistência.

Silva (2012) apurou que, dependendo do valor de EPDM adicionado ao PP, é possível aumentar a resistência ao impacto sem gerar perdas significativas em outras propriedades como: processabilidade, estabilidade térmica e rigidez. Também constatou que teores de 20 a 25% de EPDM podem ser considerados como limite máximo de adição, por não causarem mais influência sobre a resistência ao impacto (SILVA, 2012).

3.2 Reciclagem de Polipropileno

Os materiais poliméricos representam um uso bem mais nobre do petróleo do que simplesmente queimá-lo como combustível. Porém, seus impactos ao ambiente estão atrelados ao esgotamento de matéria prima não renovável e ao acúmulo de resíduos com processo difícil de degradação. A ação de reciclar busca contribuir com a redução desses impactos (ZANIN, 2009).

De acordo com o panorama mundial divulgado pela World Wide Fund for Nature (WWF) em 2019 (figura 7), o Brasil é o quarto maior gerador de lixo plástico no mundo, mas recicla apenas 1,28% do que gera, sendo que, países como Alemanha chegam a reciclar quase 38% de seus resíduos plásticos.

Figura 7 – Produção e reciclagem de plástico no mundo.

| País | Total de lixo plástico gerado* | Total incinerado | Total reciclado | Relação produção e reciclagem |
|----------------|--------------------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|
| Estados Unidos | 70.782.577 | 9.060.170 | 24.490.772 | 34,60% |
| China | 54.740.659 | 11.988.226 | 12.000.331 | 21,92% |
| Índia | 19.311.663 | 14.544 | 1.105.677 | 5,73% |
| Brasil | 11.355.220 | 0 | 145.043 | 1,28% |
| Indonésia | 9.885.081 | 0 | 362.070 | 3,66% |
| Rússia | 8.948.132 | 0 | 320.088 | 3,58% |
| Alemanha | 8.286.827 | 4.876.027 | 3.143.700 | 37,94% |
| Reino Unido | 7.994.284 | 2.620.394 | 2.513.856 | 31,45% |
| Japão | 7.146.514 | 6.642.428 | 405.834 | 5,68% |
| Canadá | 6.696.763 | 207.354 | 1.423.139 | 21,25% |

(Fonte: WWF, 2019)

* Valor total de lixo plástico descartado em resíduos sólidos urbanos, resíduos industriais, resíduos de construção, lixo eletrônico e resíduos agrícolas, na fabricação de produtos durante um ano.

Essa baixa relação entre produção e reciclagem torna-se bem preocupante, pois, no Perfil 2018 divulgado pela ABIPLAST, a previsão de consumo de transformados plásticos no Brasil até o ano de 2023 apresenta níveis crescentes até a marca de 8 milhões de toneladas. Se a taxa de reciclagem não acompanhar o aumento de consumo, apenas 102.400 toneladas serão recicladas em 2023.

Nesse sentido, desenvolveram-se métodos de reciclagem, apropriados aos diferentes tipos de resíduos, e que permitem que o ciclo de vida dos materiais seja reiniciado. Estes métodos são classificados em:

- Reciclagem primária: é realizada com materiais termoplásticos provenientes de resíduos industriais, livres de impurezas, contaminações e de fácil identificação. Também é chamada de reciclagem pré-consumo. Após processos de seleção,

moagem, lavagem e reprocessamento em extrusora e/ou injetora, o material reciclado apresenta propriedades semelhantes às da resina virgem.

- Reciclagem secundária: Também chamada de reciclagem pós-consumo, utiliza como matéria prima os resíduos sólidos urbanos. Para um resultado satisfatório, a separação correta dos resíduos é fundamental. As etapas que compreendem esse processo de reciclagem são iguais ao da reciclagem primária. Porém, por definição, as propriedades do material reciclado são inferiores às do material virgem.

- Reciclagem terciária: Trata da decomposição química dos resíduos plásticos para gerar oligômeros, monômeros e substâncias de baixa massa molar, que poderão ser polimerizados e processados novamente. Apresenta vantagem em não precisar de etapa de limpeza ou seleção do material.

- Reciclagem quaternária: É o processo de combustão dos resíduos plásticos, para aproveitar seu conteúdo energético. Os produtos gerados são energia e emissões gasosas (ZANIN, 2009).

A reciclagem do polipropileno é principalmente enquadrada nos processos primários e secundários. Neste estudo, ela foi considerada primária, apesar do material ser oriundo de pós-consumo, por ser livre de contaminações e de material de fonte única.

Fato que confirma o elevado consumo de polipropileno, é a sua presença no *ranking* das resinas mais descartadas após consumo. Como resultado disso, grandes quantidades de resíduos são descartadas em aterros sanitários, causando impacto ambiental, pois em curto prazo, o PP apresenta dificuldade de degradação por micro-organismos presentes no lixo. Assim, estudos sobre reciclagem dessa resina contribuem para aumentar a possibilidade de sua reutilização e minimizar os efeitos negativos de seu descarte no meio ambiente (PEREIRA, 2012).

Silva (2013) estudou a utilização de PP pós-consumo ao PP/EPDM como um destino sustentável ao material para produzir peças automotivas. Assim como Silva (2018) que utilizou PP reciclado proveniente de baldes industriais em PP copolímero heterofásico também com intuito de produzir peças automotivas.

3.2.1 Economia Circular

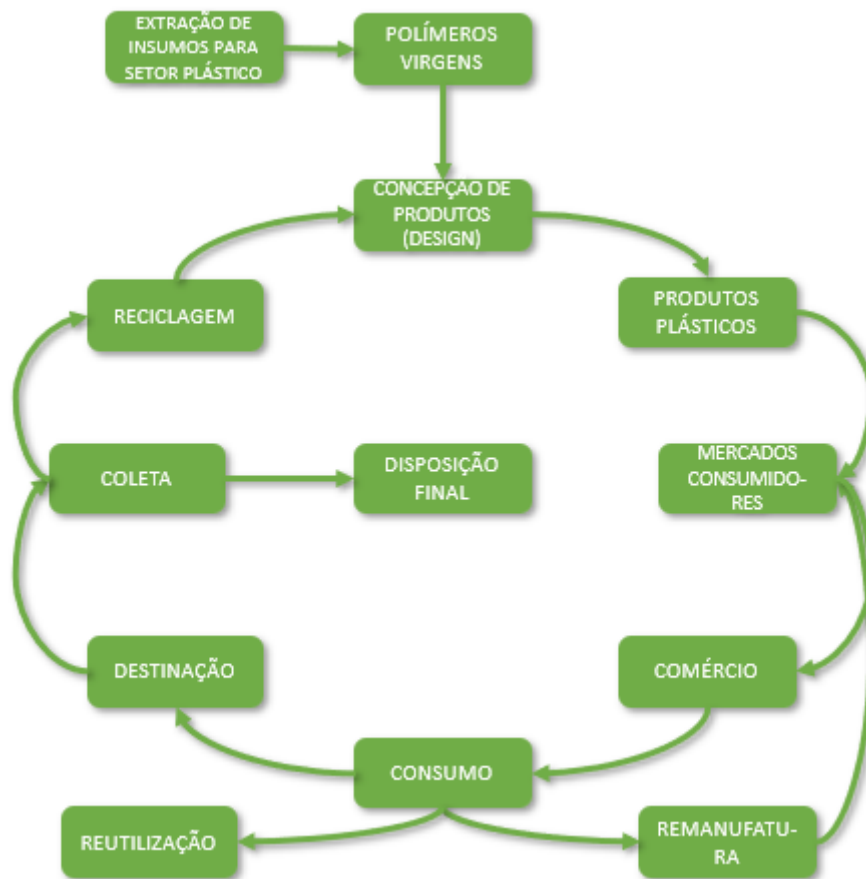
A Economia Circular é uma nova abordagem de modelo econômico, que busca o desenvolvimento restaurador e regenerativo, que preserva o capital natural através da minimização de descartes e otimização da utilização de recursos naturais com gerenciamento de reservas e de fluxos renováveis e não renováveis (EMF, 2012).

Esta nova abordagem pretende trocar o conceito de “fim-de-vida” para o de “berço ao berço”, reduzindo a geração de resíduos com aprimoramento de materiais, produtos, sistemas e modelos de negócio, e utilizando energias renováveis (LEWANDOWSKI, 2016). Assim, conseguindo dissociar a degradação ambiental do crescimento econômico.

A Economia Circular compreende três princípios: o primeiro, trata de gestão de estoques de recursos no meio ambiente e consumo de insumos; o segundo, conta com hierarquias de tratamento de materiais, aplicadas na cadeia de produtos; o terceiro, trata das externalidades geradas. Os materiais são divididos em ciclo técnico e biológico, dentro do segundo princípio. Ciclo biológico engloba materiais orgânicos que podem retornar ao meio ambiente como nutrientes, e o ciclo técnico são os materiais fabricados pelo ser humano (BARDERI, 2017).

Como parte do ciclo técnico, há a cadeia produtiva dos materiais plásticos. A economia circular sugere que o ciclo de vida do material plástico mude do modelo linear de produção e consumo, que consiste basicamente em produzir a matéria prima, fabricar o produto plástico, comercializar, consumir e descartar, para o modelo circular, que inclui etapas como: remanufaturar, reutilizar e reciclar (figura 8). Estas etapas permitem que o material se mantenha por mais tempo no ciclo de produção e consumo, até que seja extraído o máximo de seu valor.

Figura 8 – Modelo circular de produção e consumo de produtos plásticos.



(Fonte: adaptado de ABIPLAST, 2018)

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste trabalho serão apresentados os materiais e a metodologia usada para elaboração das composições avaliadas com a incorporação de resíduo de PP, assim como serão descritos os ensaios de caracterização usados.

4.1 Materiais

Os materiais utilizados foram:

- Composto de polipropileno/EPDM com 12% de talco comercializado pela empresa CPE, sob o nome INSPIRE*TF1806 Z CZ206*M. Esse material é o utilizado como matéria prima para injeção de para-choques e serviu como base para as formulações, (figura 9).

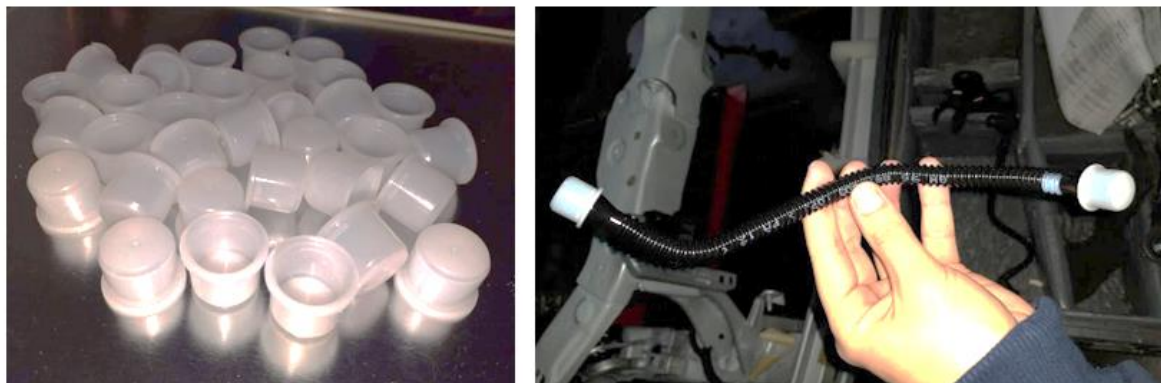
Figura 9 – Pellets de composto de polipropileno e EPDM com 12% de talco, matéria prima para injeção de para-choques.



(Fonte: elaborado pela autora)

- Tampas de polipropileno descartadas de componentes internos que são usados durante a montagem de veículos em uma montadora localizada na região da grande Porto Alegre, figura 10.

Figura 10 – Tampas de polipropileno (à esquerda) oriundas de peça automotiva (à direita).



(Fonte: elaborado pela autora)

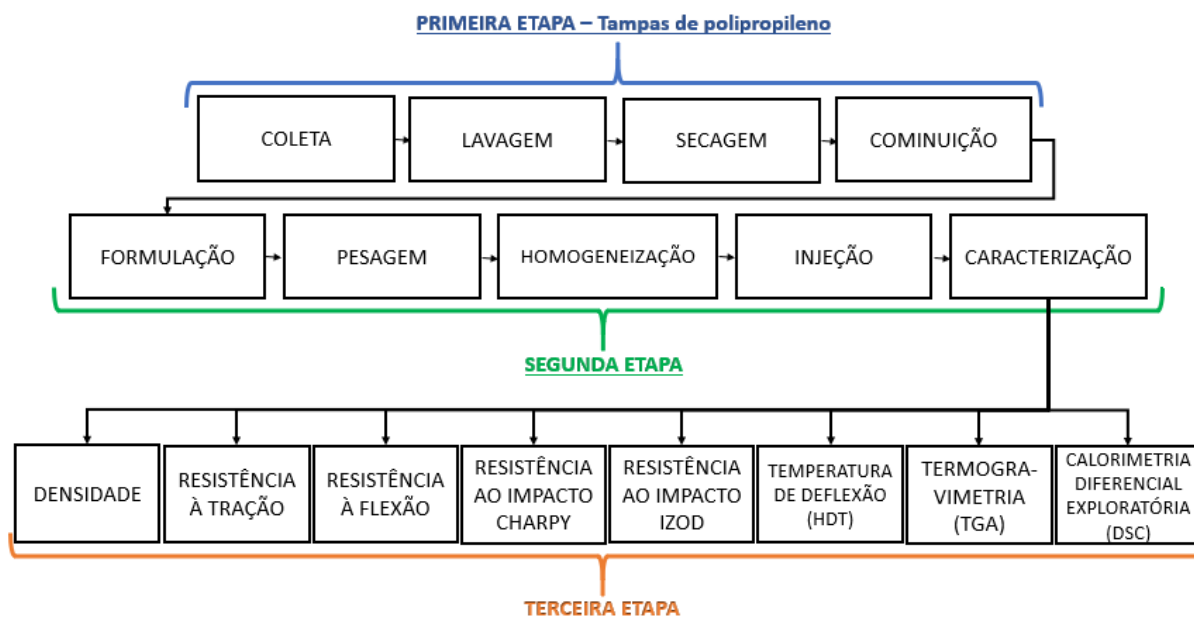
4.2 Métodos

Neste capítulo, a metodologia utilizada para construir este estudo é explicada.

A metodologia foi constituída por três etapas, como mostra o esquema na figura 11. Na primeira delas, foi feita a coleta das tampas, lavagem, secagem e cominuição. Na segunda etapa foram criadas as formulações, para injeção dos corpos de prova.

Na terceira etapa, os corpos de prova, entre 7 e 10 espécimes, foram submetidos aos ensaios de caracterização física, mecânica e térmica.

Figura 11 – Esquema ilustrativo das etapas realizadas neste trabalho.



(Fonte: elaborado pela autora)

4.2.1 Formulação dos corpos de prova

As formulações foram feitas utilizando quatro diferentes porcentagens de resíduo de polipropileno (PPr) oriundo das tampas descartadas, como mostra a tabela 3.

A porcentagem máxima utilizada de material reciclado foi de 30%, pois, de acordo com Fernandes (2007), teores maiores do que esse não apresentaram resultados adequados de propriedades mecânicas que permitiam sua utilização em para-choques.

Tabela 3 – Formulações das amostras com quatro diferentes porcentagens de polipropileno reciclado.

| AMOSTRA | PP/EPDM/talco (%) | PPr (%) |
|---------|-------------------|---------|
| A | 100 | 0 |
| B | 90 | 10 |
| C | 80 | 20 |
| D | 70 | 30 |

(Fonte: elaborado pela autora)

4.2.2 Injeção dos corpos de prova

Os corpos de prova foram injetados no Núcleo de Sustentabilidade da UFRGS, em uma injetora BONMAQ, modelo APTA 80, figura 12.

Figura 12 – Imagem da injetora usada no processamento à esquerda. Detalhe do corpo de prova ainda no molde aberto após a injeção, à direita.



(Fonte: elaborado pela autora)

Os parâmetros do processo de injeção utilizados foram os mesmos para todos os corpos de prova e estão descritos na tabela 4. A temperatura do molde foi de 20°C, com temperaturas de zonas de aquecimento de 150°C/150°C/170°C/180°C, pressão de injeção de 30 bar, pressão de recalque de 15 bar e tempo de resfriamento de 15 segundos.

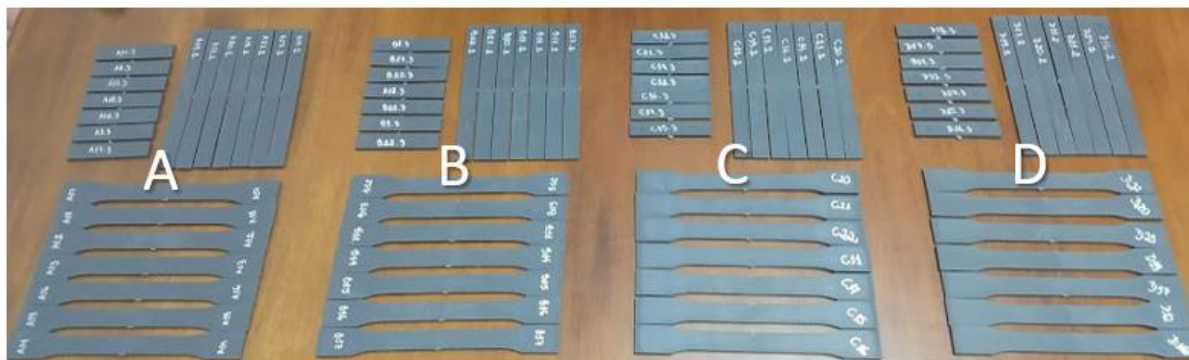
Tabela 4 – Parâmetros utilizados no processo de injeção dos corpos de prova.

| 1ª ZONA DE AQUECIMENTO | 2ª ZONA DE AQUECIMENTO | 3ª ZONA DE AQUECIMENTO | 4ª ZONA DE AQUECIMENTO (BICO) | PRESSÃO DE INJEÇÃO | PRESSÃO DE RECALQUE | TEMPERATURA DO MOLDE |
|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|
| 150°C | 150°C | 170°C | 180°C | 30 bar | 15 bar | 20°C |

(Fonte: elaborado pela autora)

Na figura 13 estão os corpos de prova dos grupos A, B, C e D, respectivamente.

Figura 13 – Da esquerda para direita estão os grupos de corpos de prova A, B, C e D, que apresentam 0%, 10%, 20% e 30% de PPr em suas composições, respectivamente.



(Fonte: elaborado pela autora)

4.3 Caracterização do resíduo e dos corpos de prova

Os ensaios de caracterização realizados foram físicos, mecânicos, termomecânicos e térmicos: densidade, resistência à tração, resistência à flexão, resistência ao impacto Charpy, resistência ao impacto Izod, temperatura de deflexão (HDT), termogravimetria (TGA) e calorimetria diferencial exploratória (DSC). Na sequência estão descritos todos os testes citados no diagrama da figura 11.

4.3.1 Densidade

As densidades dos corpos de prova foram realizadas através do método de empuxo de Arquimedes, baseado na norma ASTM D792, método B. O procedimento foi realizado no Laboratório de Polímeros da UFRGS. Os materiais utilizados foram: balança analítica Marte - modelo AY220, aparatos para adaptação da balança para ensaio de densidade, acetato de butila, e amostras dos materiais.

Primeiro, a massa das amostras secas é medida. Após, mede-se a massa da cesta vazia e imersa, e, posteriormente, a massa das amostras imersas no líquido, individualmente.

A densidade do acetato de butila foi medida por picnometria, e, para obter as densidades dos materiais, a fórmula da figura 14, abaixo, foi utilizada:

Figura 14 – Fórmula para obtenção da densidade, de acordo com ASTM D792.

$$\rho^{23^{\circ}C} = \frac{a}{a + w - b} \times \rho_{acetato\ de\ butila}$$

Onde:

a = massa do corpo de prova seco

w = massa da cesta imersa no acetato de butila

b = massa do corpo de prova imerso no acetato de butila

$\rho_{acetato\ de\ butila}$ = densidade do acetato de butila

(Fonte: adaptado de ASTM D792)

4.3.2 Ensaio Mecânico de Tração

O ensaio de tração foi realizado no LAPOL, em um equipamento INSTRON EMIC 23-5D, com velocidade de 50 mm/min e célula de carga de 5 kN, conforme norma ASTM D638, que prevê a deformação da amostra mediante uma carga de tração gradativamente crescente, aplicada ao longo do eixo mais comprido do corpo de prova, geralmente, até sua ruptura.

Eles serviram para avaliar as propriedades mecânicas dos quatro grupos de amostras, através de curvas de tensão-deformação, de onde foram extraídas informações como: módulo de elasticidade em tração, tensão e deformação no ponto de escoamento e no ponto de ruptura, e a tenacidade.

4.3.3 Ensaio Mecânico de Flexão

O ensaio de flexão de três pontos foi realizado no LAPOL, em um equipamento INSTRON EMIC 23-5D, com velocidade de 5 mm/min e célula de carga de 5 kN, conforme norma ASTM D790, até a deformação de 5% dos corpos de prova. O corpo de prova, apoiado sobre dois apoios, sofre carga de flexão gradativa e crescente no ponto de metade de seu comprimento, neste caso, até a deformação atingir 5%.

Eles serviram para avaliar as propriedades mecânicas dos quatro grupos de amostras, através de curvas de flexão, de onde foram extraídas informações como: módulo e tensão sob flexão.

4.3.4 Ensaio Mecânico de Impacto Charpy e Izod

Para o ensaio Charpy, realizado pelo SENAI – Centro Tecnológico de Polímeros, os corpos de prova permaneceram durante quatro horas em um Ultra Freezer com temperatura igual a -30°C , e foram ensaiados de acordo com a norma ASTM D6110, com entalhe do tipo A e martelo com energia de 1J.

Para o ensaio Izod, realizado no LAPOL, os corpos de prova permaneceram a temperatura ambiente, e foram ensaiados de acordo com a norma ASTM D256, método A e martelo com energia de 2,75J.

O objetivo é analisar o comportamento dúctil-frágil das amostras sob impacto com diferentes teores de material reciclado na composição em temperaturas baixa e ambiente.

4.3.6 Temperatura de Deflexão (HDT)

A temperatura de deflexão térmica (HDT) foi obtida através de ensaio no SENAI – Centro Tecnológico de Polímeros, baseado na norma ISO 75, método A, com taxa de aquecimento de $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e tensão de 1,80 MPa, equipamento CEAST HDT VICAT Serial 18774.

A partir dessa temperatura, o escoamento viscoso é mais pronunciado no polímero. Quanto mais alto for seu valor, maior será a resistência do material à deformação pelo calor (MANO, 1991). Essa informação auxilia no estudo da utilização do material em aplicações que exigem temperaturas severas.

4.3.7 Termogravimetria (TGA)

A técnica de termogravimetria fornece, através do aquecimento da substância em estudo a uma taxa controlada em um ambiente apropriado, a análise

composicional do material, pela perda de massa em faixas específicas de temperatura (ASTM, 2014).

As análises foram realizadas pelo LAPOL, em um equipamento TGA Q50 V20.13 Build 39, em atmosfera de nitrogênio com fluxo de 90 mL/min, taxa de aquecimento de 20°C/min com faixa de temperatura de 0 - 940°C.

O composto virgem PP/EPDM/talco, as tampinhas e o material com teor de 30% de PP reciclado foram submetidos ao teste.

4.3.8 Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC)

As análises foram realizadas pelo LAPOL, no equipamento TA Instruments - DSC Q20 V24.11 Build 124. As amostras passaram por um ciclo de aquecimento em atmosfera de nitrogênio com fluxo de 50 mL/min, taxa de 10°C/min com faixa de temperatura de 25 - 230°C.

Através da calorimetria diferencial exploratória pode-se obter o índice de cristalinidade, temperatura de fusão, entalpia de fusão e temperatura de início de cristalização dos polímeros.

O composto virgem PP/EPDM/talco, as tampinhas e o material com teor de 30% de PP reciclado foram submetidos ao teste.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, os resultados de todos os ensaios são expostos e discutidos com base na literatura.

Para fins de comparação, os resultados obtidos da amostra com teor de 0% de polipropileno reciclado foram considerados o padrão de desempenho mínimo a ser alcançado pelas outras amostras.

5.1 Análise da Densidade dos Corpos de Prova

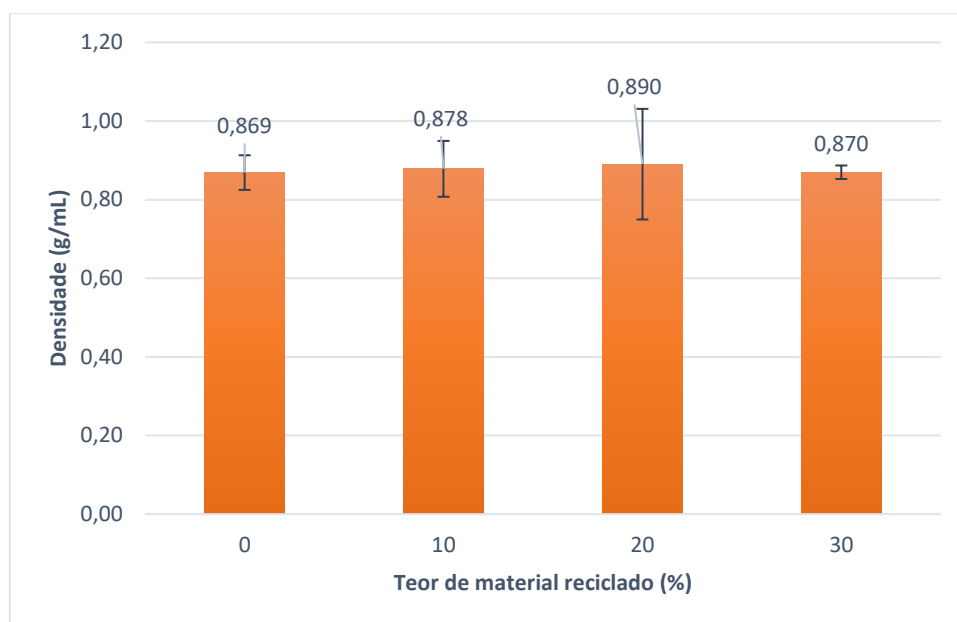
Os resultados obtidos no ensaio de densidade estão expostos na figura 15.

A adição de PP reciclado à composição do PP/EPDM não trouxe aumento significativo à densidade. A amostra com 0% de PP reciclado em sua composição, apresentou 0,869 g/mL, enquanto a amostra com 30% de PP reciclado em sua composição, apresentou 0,870 g/mL, uma diferença de apenas 1 milésimo.

A única amostra a apresentar diferença mais expressiva, quando comparada à densidade do material virgem, foi a amostra com 20% de PP reciclado na composição, com 2,46% de aumento. Porém, seu desvio padrão está fora dos 10% da média obtida, sendo necessário que mais amostras sejam ensaiadas para que o resultado fique dentro dos parâmetros estatísticos.

Por se tratar da incorporação de material reciclado que é polipropileno, o mesmo presente na matriz, já era esperado que não houvesse aumento significativo de densidade.

Figura 15 – Densidades dos corpos de prova em função do teor de PPr.



(Fonte: elaborado pela autora)

5.2 Propriedades Mecânicas de Tração dos Compostos

A Tabela 5 mostra os valores médios das propriedades mecânicas obtidos nos ensaios de tração realizados nas amostras com composições de 0%, 10%, 20% e 30% de material reciclado. “ σ_{esc} ” e “ ϵ_{esc} ” representam a tensão e a deformação de tração no ponto de escoamento, respectivamente, e “ σ_{rup} ” e “ ϵ_{rup} ” representam a tensão e a deformação no ponto de ruptura, respectivamente. O módulo de Young é representado por “E”.

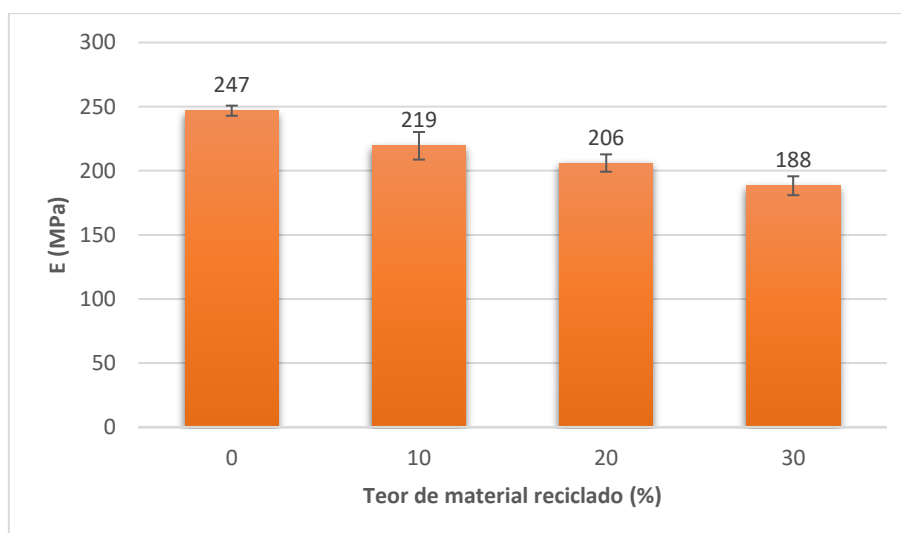
Tabela 5 – Médias das propriedades mecânicas das amostras retiradas do ensaio de tração.

| AMOSTRA | E (MPa) | σ_{esc} (MPa) | ϵ_{esc} (mm) | σ_{rup} (MPa) | ϵ_{rup} (mm) | Tenacidade (J) |
|---------|----------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------|
| 0% | 247 ± 4 | 17,63 ± 0,18 | 6,47 ± 0,17 | 6,06 ± 0,26 | 12,11 ± 0,99 | 6,93 ± 0,69 |
| 10% | 219 ± 11 | 17,53 ± 0,90 | 7,5 ± 0,29 | 6,34 ± 0,61 | 19,93 ± 1,77 | 11,80 ± 0,75 |
| 20% | 206 ± 7 | 17,67 ± 0,54 | 8,28 ± 0,78 | 7,1 ± 0,67 | 15,56 ± 0,95 | 9,24 ± 0,63 |
| 30% | 188 ± 7 | 17,62 ± 0,61 | 8,97 ± 0,70 | 6,3 ± 0,46 | 19,09 ± 0,99 | 10,69 ± 0,94 |

(Fonte: elaborado pela autora)

Na figura 16, pode-se notar que com o aumento da porcentagem do PPr na composição, o módulo elástico apresenta decréscimo de valor, correspondendo a uma diminuição de quase 24% entre as amostras de 0% e 30%. Isso significa que o material perdeu rigidez.

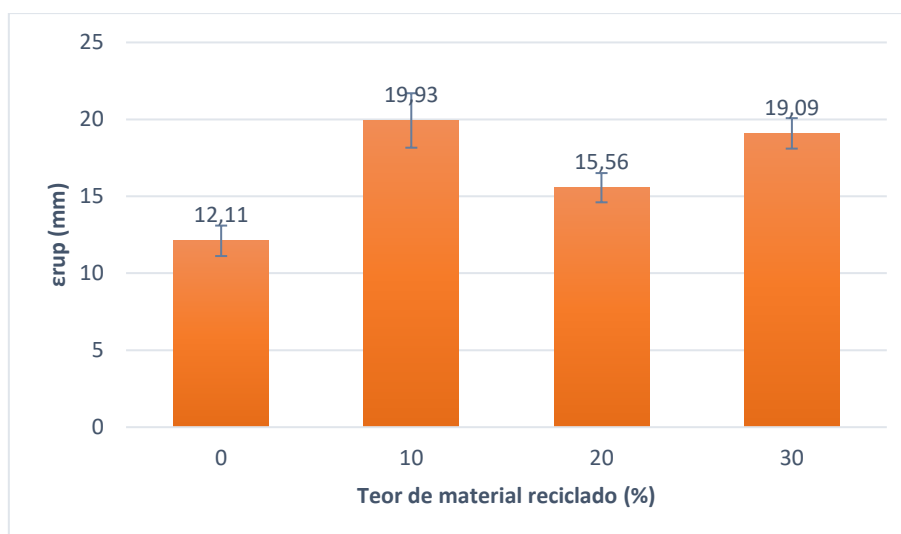
Figura 16 – Módulo de Young das amostras em função do teor de PPr.



(Fonte: elaborado pela autora)

Esse comportamento também pode ser observado através das médias de deformação no ponto de ruptura, figura 17. Todas as amostras apresentaram deformações, sendo que aquelas com teor de 10% e 30% foram as que apresentaram valores mais significativos (64% e 57%, respectivamente) do que a amostra injetada sem material reciclado na formulação, confirmando um desempenho mais borrachoso.

Figura 17 – Deformações das amostras no ponto de ruptura em função do teor de PPr.



(Fonte: elaborado pela autora)

A tensão no ponto de ruptura foi semelhante para as amostras sem mistura, 10% e 30%, tendo apresentado valor ligeiramente maior para amostra 20%, que foi a que rompeu com menor deformação.

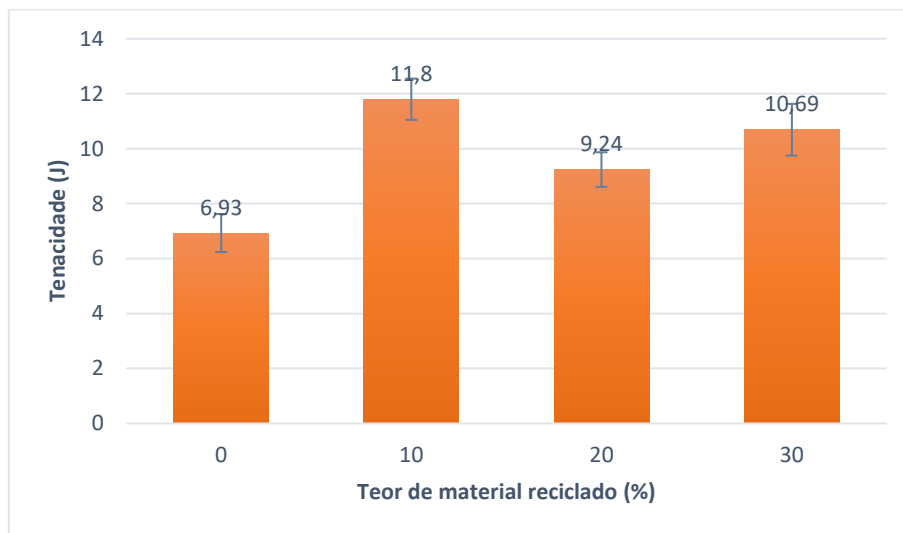
Os resultados do presente estudo se contrapõem aos encontrados por Oliveira (2006). Em sua dissertação, a adição de polipropileno reciclado ao material do para-choque diminuiu sua deformação na ruptura e aumentou seu módulo elástico, tornando-o mais frágil, principalmente, em teores maiores do que 30%. Apesar do decréscimo nas propriedades, o autor considerou que o desempenho foi similar ao material virgem das amostras com 30%.

No estudo de Silva (2013) foram incorporados teores de PP reciclado de 28%, 35%, 42% e 70% ao PP/EPDM. Com 28% e 35% o módulo elástico apresentou aumento, mas a deformação no ponto de ruptura diminuiu com 28% e aumentou com 35%. Esse comportamento do material no ponto de ruptura corroborou em parte com o presente estudo, pois as amostras com 30% de PP reciclado tiveram desempenho semelhante ao descrito por Silva (2013).

A tenacidade do material também teve aumento de desempenho com a adição de material reciclado à composição. Essa propriedade permite que o material sofra deformações altas sem sofrer rompimento.

De acordo com a figura 18, a energia necessária para romper o material virgem foi de 6,93J, sendo que com 10% de material reciclado na composição, o material requereu 11,8J para seu rompimento. Isso representa um acréscimo no desempenho de 70%, que é algo muito significativo tendo em vista a aplicação desse material no setor automobilístico.

Figura 18 – Tenacidade das amostras em função do teor de PPr.



(Fonte: elaborado pela autora)

5.3 Propriedades Mecânicas de Flexão dos Compostos

A Tabela 7 mostra os valores médios das propriedades mecânicas obtidos nos ensaios de flexão realizados nas amostras sem e com 10%, 20% e 30% de material reciclado. O módulo sob flexão é representado por “ E_{flex} ”, e “ σ_{flex} ” representa a tensão sob flexão.

Tabela 6 – Médias das propriedades mecânicas das amostras retiradas do ensaio de flexão.

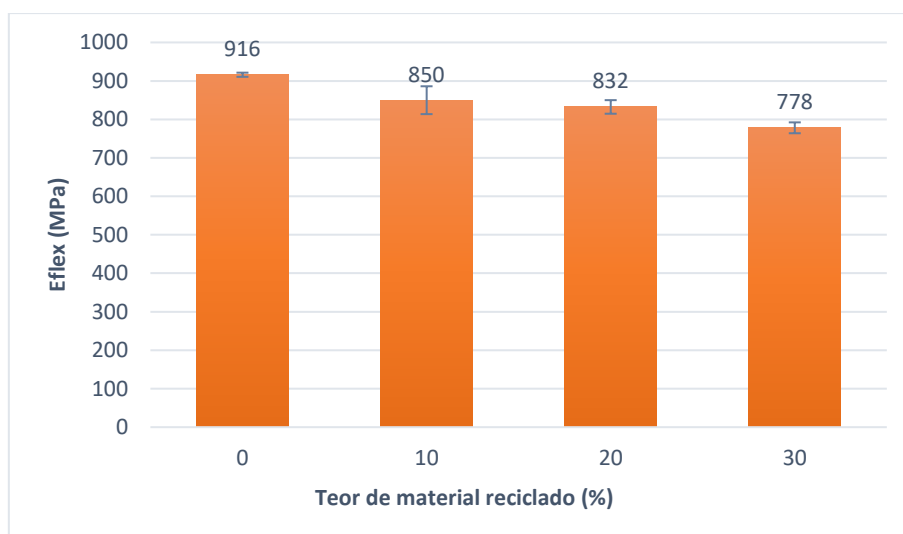
| AMOSTRA | E_{flex} (MPa) | σ_{flex} (MPa) |
|----------------|------------------------------------|---|
| 0% | 916 ± 5 | 23,34 ± 0,26 |
| 10% | 850 ± 36 | 22,82 ± 0,57 |
| 20% | 832 ± 18 | 22,16 ± 0,35 |
| 30% | 778 ± 14 | 21,7 ± 0,22 |

(Fonte: elaborado pela autora)

Através da figura 19, pode-se notar que com o aumento da porcentagem de material reciclado na composição, o módulo sob flexão apresenta decréscimo de valor, correspondendo a uma diminuição de 15% entre as amostras de 0% e 30%.

Como foi visto também nos resultados de módulo Young, o comportamento do material demonstra sua perda de rigidez.

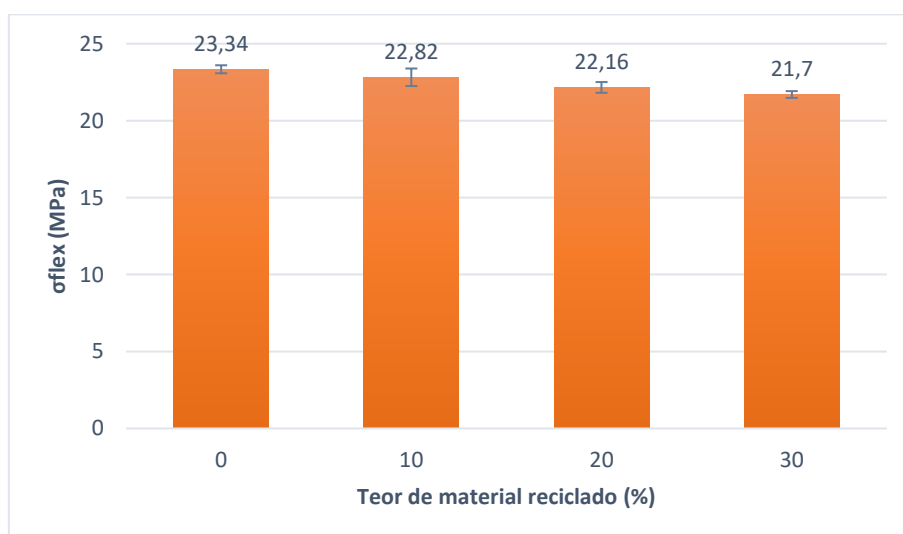
Figura 19 – Módulo de flexão das amostras em função do teor de PPr.



(Fonte: elaborado pela autora)

A tensão sob flexão também apresentou redução com a adição de maiores teores de PP reciclado ao material (figura 20). Significa que menores valores de tensão foram necessários para flexionar o material até a deformação de 5%. As amostras com 30% de PP reciclado apresentaram valor 7% menor do que o material virgem.

Figura 20 – Tensão sob flexão das amostras em função do teor de PPr.



(Fonte: elaborado pela autora)

Os resultados encontrados aqui se contrapõem aos encontrados por Silva et al (2018). Em seu estudo de adição de PP reciclado ao PP copolímero heterofásico com teores de 0%, 20%, 40% e 60% encontrou-se que o aumento da adição de material reciclado causou aumento do módulo elástico e da tensão sob flexão, indicando aumento de rigidez. É possível que uma das influências para a diferença entre os resultados dos dois estudos seja o EPDM, que permite ao polipropileno condições mais elastoméricas.

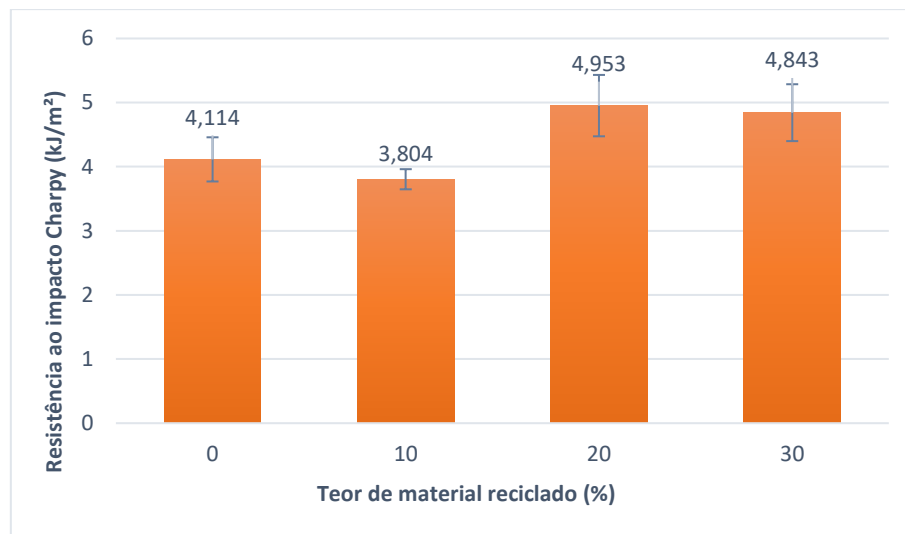
Outros estudos encontrados que incorporaram PP reciclado ao PP/EPDM não realizaram ensaios de flexão, não viabilizando assim a realização da comparação dos desempenhos para este quesito.

5.4 Impacto Charpy e Izod

Diferentemente dos estudos encontrados que utilizaram polipropileno oriundo de resíduos incorporados ao PP/EPDM ou PP copolímero heterofásico, aqui foi realizado ensaio de impacto a baixas temperaturas, para avaliar o comportamento do material com diferentes teores de PP reciclado quando submetido a esforços mecânicos em temperaturas mais agressivas.

No ensaio de impacto Charpy a -30°C , mesmo com a temperatura muito baixa, as amostras com teores de 20% e 30% de PP reciclado apresentaram desempenho superior ao material virgem, como mostra a figura 21, com acréscimos de 20% e 17%, respectivamente.

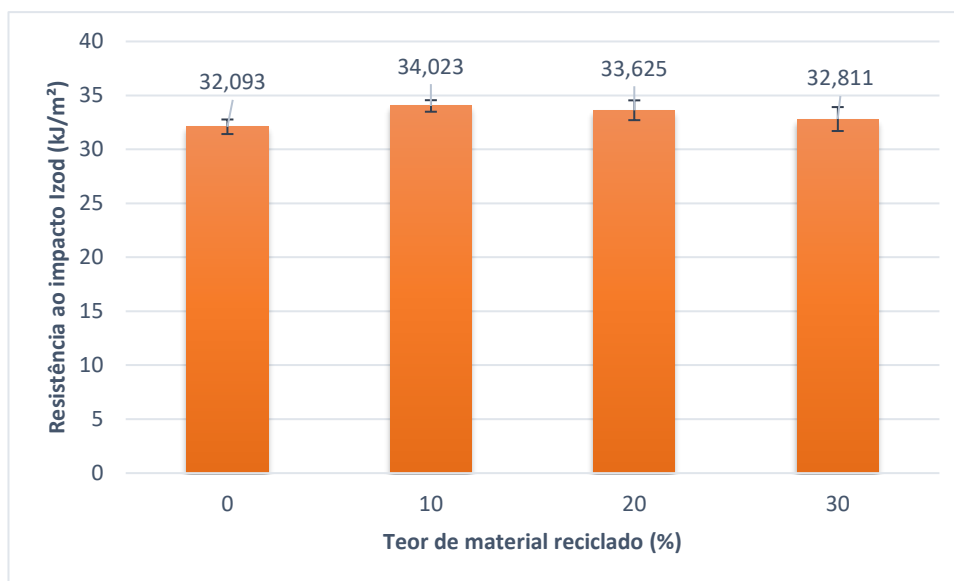
Figura 21 – Resistência ao impacto Charpy a temperatura de -30°C das amostras em função do teor de PPr.



(Fonte: elaborado pela autora)

Os resultados do ensaio de resistência ao impacto Izod sob temperatura de 23°C, foram satisfatórios considerando que as composições com diferentes teores de material reciclado superaram o desempenho do material virgem. As amostras com 10% de PP reciclado apresentaram o maior valor de resistência, sendo ele 6% maior do que o apresentado pelo material virgem, como mostra a figura 22.

Figura 22 – Resistência ao impacto Izod a temperatura de 23°C das amostras em função do teor de PPr.



(Fonte: elaborado pela autora)

No estudo de Fernandes (2007) foi realizado ensaio Charpy a temperatura de 20°C com corpos de prova de PP/EPDM com teores de PP reciclado de 0%, 30%, 50% e 100%. O material virgem teve o melhor resultado, o material com 30% de PP reciclado teve queda de 30% no desempenho, enquanto as misturas com 50 e 100% de PP reciclado tiveram quedas ainda maiores na resistência ao impacto, 46% e 75%, respectivamente. Esses resultados não refletem os obtidos no presente estudo.

Já o estudo de Silva (2013) utilizando proporções de PP heterofásico/PPresíduo/EPDM com teores em massa de 70/0/30, 42/28/30, 35/35/30, 28/42/30 e 0/70/30 apresentou resultados de resistência ao impacto em ensaio Izod em acordo com o que foi encontrado nesta pesquisa, pois o aumento do teor de PP resíduo até 35% trouxe melhora no desempenho do material em resistência ao impacto, chegando a um acréscimo de quase 27%, enquanto que a incorporação de teores maiores do que 35% causaram aumento da rigidez e queda da tenacidade.

O estudo de Silva (2018) que utilizou PP copolímero heterofásico e PP reciclado proveniente de baldes industriais com teores de material reciclado de 0%, 20%, 40% e 60%, encontrou resultados de ensaio de impacto Izod a 23°C que não foram ao encontro do exposto no presente estudo, pois em todos os teores houve

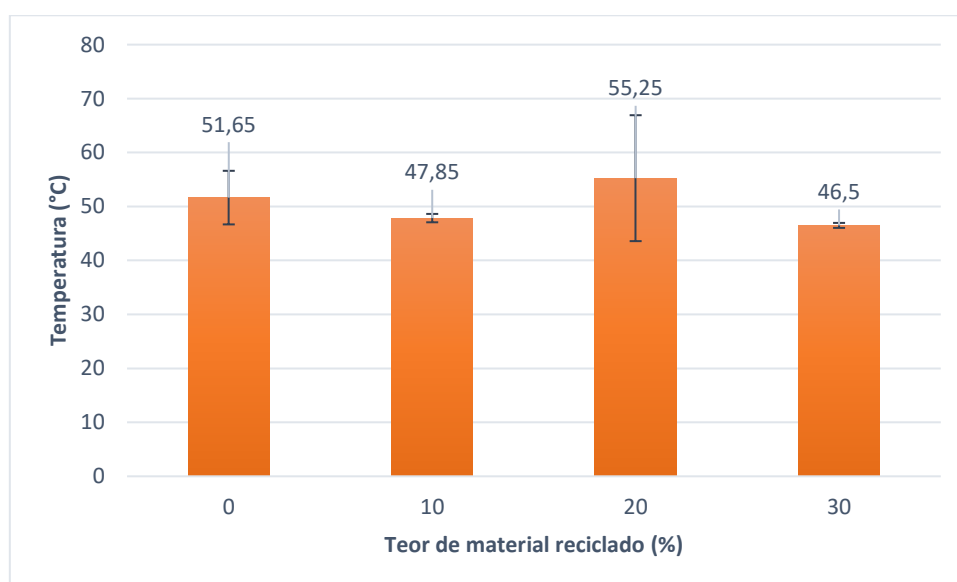
decréscimo do desempenho do material em resistência ao impacto, justificado pelo aumento da cristalinidade da mistura, que fragilizou o material.

5.5 Temperatura de Deflexão (HDT)

Os resultados do ensaio de temperatura de deflexão térmica (HDT) foram afetados pelo fato de que os tamanhos dos corpos de prova eram menores do que os recomendados pela norma. Alguns corpos de prova deslocaram-se durante a execução do teste, sendo invalidados. Isso fez com que a média dos resultados válidos fosse reduzida de cinco para dois, para os teores de 10% e 20%.

De acordo com os resultados obtidos (figura 23), o material com teores de 10% e 30% de polipropileno reciclado defletiu em temperaturas menores do que o material virgem, sendo mais suscetível à temperatura, quando submetido a esforço mecânico. As reduções foram de 7% e 10%, respectivamente. É possível que a diminuição no teor de talco da composição tenha resultado nessa queda da temperatura, pois de acordo com Zweifel (2009) a temperatura HDT é influenciada pelo teor de talco presente na estrutura dos polímeros.

Figura 23 – Médias das temperaturas de deflexão térmica das amostras com teores de PP reciclado de 0%, 10%, 20% e 30%.



(Fonte: elaborado pela autora)

5.6 Análise dos Resultados do Ensaio de Termogravimetria (TGA)

As análises de termogravimetria foram realizadas em amostras das tampinhas de PP, do PP/EPDM virgem e do PP/EPDM com 30% de PP reciclado, oriundo das tampinhas.

Através dos resultados exibidos na tabela 7 e figura 24 é possível observar que houve degradação completa das tampinhas em temperatura inicial de decomposição de 373°C, com temperatura de 5% de perda de massa de 423°C, indicando sua composição sem indícios de cargas inorgânicas ou aditivos orgânicos.

O material virgem também apresentou decomposição inicial de 86% de perda de massa em temperatura inicial de 386°C, com temperatura de 5% de perda de massa de 433°C correspondente ao PP e EPDM. A decomposição foi finalizada em 500°C e a porcentagem de cinzas se manteve constante em 14% até o final do ensaio, representando o teor de talco presente na composição do material.

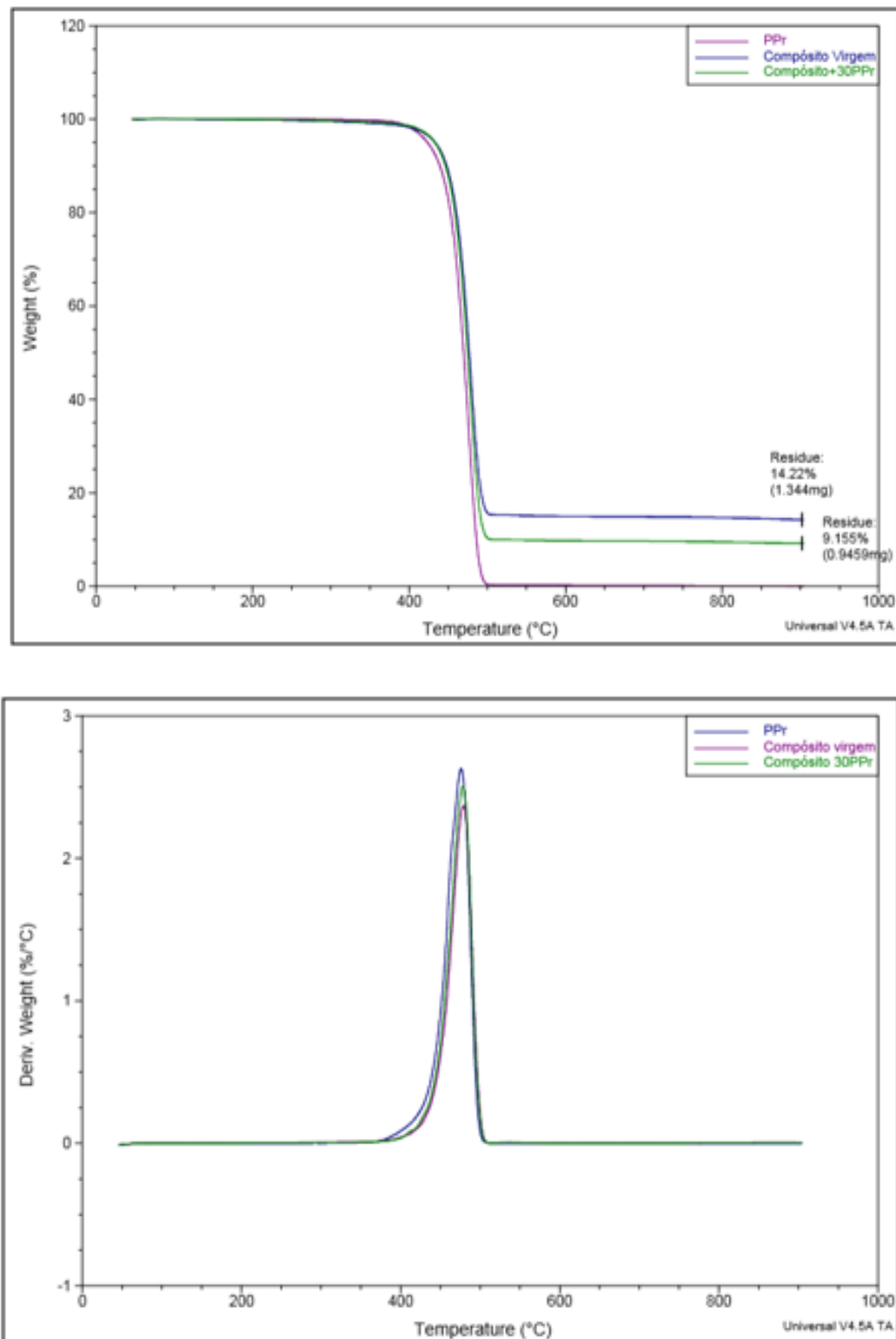
Já o PP/EPDM com 30% de PP reciclado apresentou decomposição inicial em 395°C, com temperatura de 5% de perda de massa de 433°C, e perda de massa de 91%, por ter em sua composição mais polipropileno adicionado oriundo das tampinhas, que não continha talco e nenhum outro componente inorgânico. Em 500°C, a decomposição foi finalizada, assim como no material virgem, porém, apenas 9% de cinzas se mantiveram constantes até o final do ensaio, porque a quantidade de talco foi reduzida na composição, quando o PP reciclado foi adicionado.

Tabela 7 – Ensaio de termogravimetria (TGA) das tampinhas de PP, do PP/EPDM virgem e do PP/EPDM com 30% de PP reciclado. Curvas TGA à esquerda e curvas DTG à direita.

| Amostra | TGA | | | DTG | |
|-----------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------|------------|------------------------|
| | T _{início} (°C) | Perda de massa (%) | T _{início / 5%} (°C) | Cinzas (%) | T _{pico} (°C) |
| Tampinha | 373 | 100 | 423 | 0 | 476 |
| PP/EPDM virgem | 386 | 86 | 433 | 14 | 479 |
| PP/EPDM 30% PPr | 395 | 91 | 433 | 9 | 478 |

(Fonte: elaborado pela autora)

Figura 24 – Ensaio de termogravimetria (TGA) das tampinhas de PP, do PP/EPDM virgem e do PP/EPDM com 30% de PP reciclado. Curvas TGA (superior) e curvas DTG (inferior).



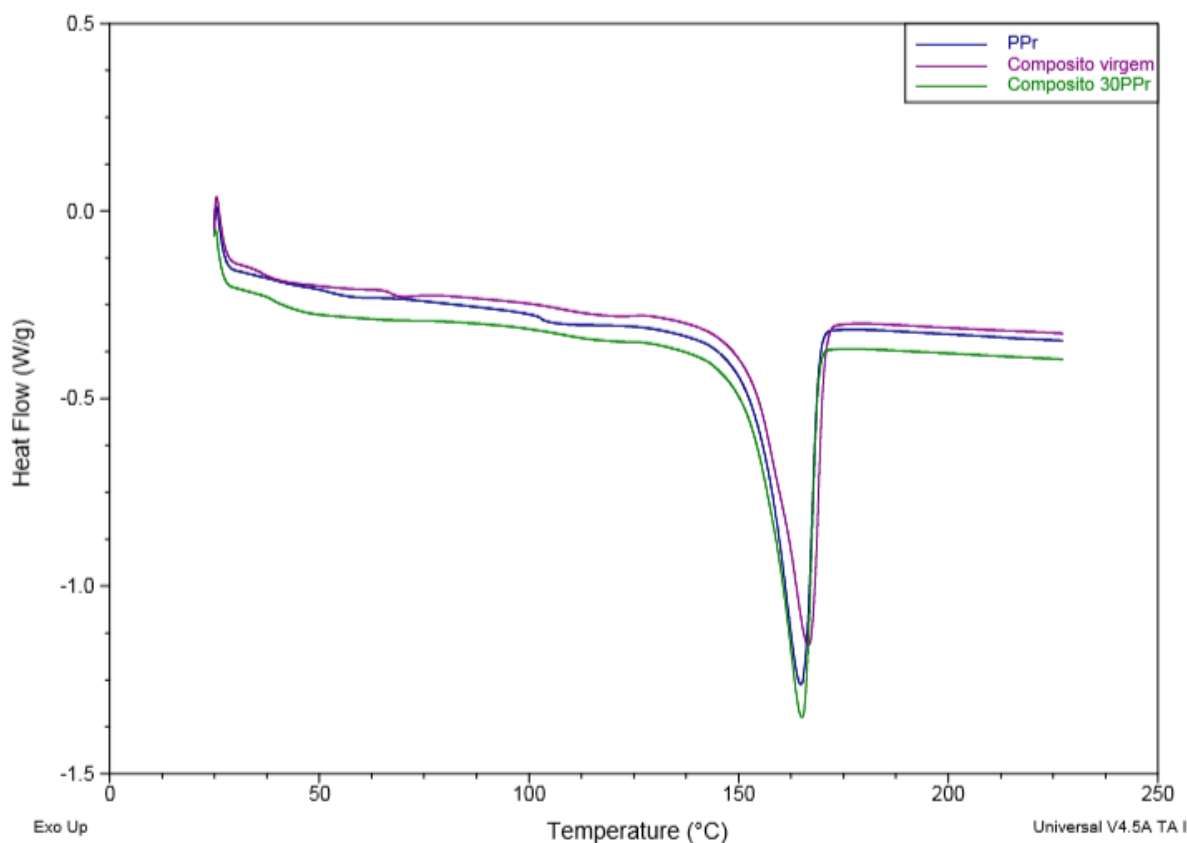
(Fonte: elaborado pela autora)

5.7 Ensaio de Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC)

As análises de calorimetria diferencial exploratória foram realizadas em amostras das tampinhas de PP, do PP/EPDM virgem e do PP/EPDM com 30% de PP reciclado, oriundo das tampinhas.

Através dos resultados exibidos na figura 25 e tabela 8 é possível observar que a entalpia de fusão da tampinha é maior do que a do material virgem, indicando que sua cristalinidade é maior. Como resultado da incorporação de 30% de tampinhas no material virgem, a entalpia de fusão da mistura foi mais elevada do que a dos materiais separados, mostrando a influência da cristalinidade do resíduo de polipropileno na composição do material final. Como consequência, a temperatura de fusão da mistura apresentou valor igual ao do resíduo, menor do que a do material virgem.

Figura 25 – Curvas de DSC das tampinhas de PP, do PP/EPDM virgem e do PP/EPDM com 30% de PP reciclado.



(Fonte: elaborado pela autora)

Tabela 8 – Entalpia de fusão e temperatura de fusão obtidas das curvas de DSC.

| Amostra | $\Delta H_{\text{fusão}}$ (J/g) | $T_{\text{fusão}}$ (°C) |
|-----------------|---|---|
| Tampinha | 63,3 | 165 |
| PP/EPDM virgem | 59,82 | 167 |
| PP/EPDM 30% PPr | 64,60 | 165 |

(Fonte: elaborado pela autora)

Os estudos de Silva (2018) também apresentaram valores de entalpia de fusão maiores com a adição de PP reciclado ao PP copolímero heterofásico, mostrando a influência da cristalinidade do polipropileno reciclado na mistura com o material virgem. Ele atribuiu o aumento da cristalinidade à possível massa molar menor do PP reciclado quando comparado à resina virgem, que causou a redução da viscosidade, favorecendo o aumento do grau de cristalinidade da mistura.

6 CONCLUSÕES

Os resultados mais significativos extraídos do presente estudo demonstraram que as propriedades módulo elástico em tração, deformação no ponto de ruptura, tenacidade, módulo sob flexão, tensão sob flexão, resistência ao impacto Charpy a -30°C, resistência ao impacto Izod a 23°C e temperatura de deflexão térmica (HDT) obtiveram resultados mais satisfatórios com a adição do PP reciclado em todos os teores em comparação ao material virgem.

No entanto, a análise dos resultados demonstrou que dentre os teores utilizados, 30% poderia ser a porcentagem ideal de mistura, todavia o ensaio de HDT impõe a ressalva de que, neste caso, o material torna-se mais suscetível à temperatura, quando submetido a esforço mecânico restringindo sua aplicação.

Levando em conta apenas o lado sustentável, a adição de PP reciclado à mistura no teor de 30% seria a mais adequada. Porém, sob análise de desempenho *versus* sustentabilidade, limitar a incorporação de teores entre 10% e 20% de material reciclado, em virtude dos resultados obtidos, parece ser o mais indicado.

Assim sendo, é possível reintegrar resíduo de polipropileno ao ciclo produtivo de veículos, através de seu uso na matéria prima utilizada no processo de injeção de para-choques.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Ensaio de caracterização das tampas.
- Ensaio de flamabilidade dos corpos de prova.
- Ensaio de envelhecimento dos corpos de prova.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPLAST - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO. **PERFIL DO ANO DE 2017**. Disponível em: abiplast.org.br/publicacoes/perfil-2017. Acesso em: 1 nov. 2019.

ABIPLAST - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO. **PERFIL DO ANO DE 2018**. Disponível em: abiplast.org.br/publicacoes/perfil2018. Acesso em: 1 nov. 2019.

ALVES, A. L., *et al.* **Estudo da qualidade do reciclado obtido a partir de garrafas de água mineral (polipropileno)**. Revista Redes, n. 7, p. 107-124, 2002.

AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL. **Physics in the crumple zone demonstrate how less stiff materials, like plastic, can help prevent injury and save lives**. Disponível em: https://www.automotiveplastics.com/wp-content/uploads/CrumpleZones_123010.pdf. Acesso em: 4 nov. 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1131 - 08(2014): Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry**. West Conshohocken, 2014. 6 p.

AUTOMOTIVE PLASTICS. **Automotive plastics today**. Disponível em: <https://www.automotiveplastics.com/automotive-plastics-today/exterior/>. Acesso em: 22 out. 2019.

BARDERI, M.T. **Aplicação dos princípios da economia circular em uma indústria de veículos comerciais**. Dissertação. São Paulo, 2017.

BIRLEY, A.W., *et al.* **PLASTICS MATERIALS: PROPERTIES AND APPLICATIONS**. 2. ed. New York: Springer Science + Business Media, 1988. p. 72-75.

CANEVAROLO S.V. **Chain scission distribution function for polypropylene degradation during multiple extrusions**. Polymer Degradation and Stability. V. 70, N. 1, P. 71-76, 2000.

CLEMONS, C. **Elastomers modified polypropylen-polyethylene blends as matrices for wood flour - plastics composites**. EUA, 2010.

DA CUNHA, F. R. **Modelos para predição de propriedades finais de polímeros a partir de variáveis operacionais**, TESE DE DOUTORADO, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

EMF - ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards the circular economy - Vol. 1: Economic and business rationale for an accelerated transition**. Isle of Wight: EMF, 2012.

FARIA, E.C. **Blendas de Poli (cloreto de vinila) e do elastômero termoplástico poliestireno-g-(etileno-co-propileno-co-dieno)-gacrilonitrila.** Tese de Mestrado. Universidade de Campinas, 2008.

FERNANDES, B.L., *et al.* **Caracterização Mecânica de Polipropileno Reciclado para a Indústria Automotiva.** *Polímeros*. São Carlos, v. 17, n. 2, p. 85-87, jun./2007.

FOLHA DE SÃO PAULO. **Setor automotivo é principal alvo da indústria química.** Disponível em: www1.folha.uol.com.br/mercado/2013/01/1221046-setor-automotivo-e-principal-alvo-da-industria-quimica.shtml. Acesso em: 1 out. 2019.

GOSHAL S., *et al.* **High impact strenght polypropilene containing carbono nanotubes.** *Polymer*, v.100, p 259-274, 2016.

HARPER, C.A., *et al.* **Plastic materials and processes: a concise encyclopedia.** 1. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2003. p. 341-341.

HASSAN, C. S. *et al.* **Crash Performance of Oil Palm Empty Fruit Bunch (OPEFB) Fibre Reinforced Epoxy Composite Bumper Beam using Finite Element Analysis.** *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. Malásia, v. 15, n. 4, p. 5826-5836, dez./2018.

INÁCIO, A. L., *et al.* **Recycled PP/EPDM/talc reinforced with bamboo fiber: Assessment of fiber and compatibilizer content on properties using factorial design.** *POLYMER TESTING*, São Bernardo do Campo, v. 61, n. 1, p. 214-222, ago./2017.

JOHN, A., *et al.* **A Review on the Composite Materials used for Automotive Bumper in Passenger Vehicles.** *International Journal of Engineering and Management Research*. India, v. 4, n. 4, p. 98-101, ago./2014.

JUNIOR, S. V. C. **TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DE POLÍMEROS.** 1. ed. SÃO PAULO: ARTLIBER, 2003. p. 361-384.

KESKKULA, H. **RUBBER MODIFIED THERMOPLASTICS.** 1. ed. INDIA: RAPRA TECHNOLOGY, 2000. p. 4-5.

KIM, D. *et al.* **Strain rate dependent mechanical behavior of glass fiber reinforced polypropylene composites and its effect on the performance of automotive bumper beam structure.** *Composites Part B*. South Korea, v. 2, n. 166, p. 483-496, fev./2019.

LEWANDOWSKI, Mateusz. **Designing the Business Models for Circular Economy—Towards the Conceptual Framework.** *Sustainability*, Basel, v. 8, n. 1, p. 43, jan. 2016.

MAIER, Clive; CALAFUT, Tereza. **Polypropylene the Definitive User's Guide and Databook.** EUA: Plastics Design Library, p. 49, 1998.

MANO, E.B. **POLÍMEROS COMO MATERIAIS DE ENGENHARIA.** 1. ed. SÃO PAULO: EDGARD BLUCHER, 1991. p. 68-71.

MINISTÉRIO DA ECONOMIA, INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS. **Rota 2030 - Mobilidade e Logística**. Disponível em: <http://www.mdic.gov.br/index.php/competitividade-industrial/setor-automotivo/rota2030>. Acesso em: 14 out. 2019.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Política nacional de resíduos sólidos**. Disponível em: <https://www.gov.br/politicas-de-residuos-solidos>. Acesso em: 8 nov. 2019.

NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION - NHTSA. **Bumper Q & A's**. Disponível em: <https://one.nhtsa.gov/cars/problems/studies/bumper/index.html>. Acesso em: 18 out. 2019.

NAUSHAD, M.D., *et al.* **Development of biocomposite from recycled polypropylene obtained from end-of-life car bumper: Evaluation of mechanical, thermal & morphological properties**. Int J Plast Technol. India. v. 18, n. 3, p. 409-417, dez./2014.

OLIVEIRA, A.J.D. **Caracterização Mecânica e Reológica de Polipropileno Reciclado para a Indústria Automotiva**. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO. Engenharia Mecânica. UFPR, Curitiba, 2006.

ORTH, C. M. *et al.* **A geração de resíduos sólidos em um processo produtivo de uma indústria automobilística: uma contribuição para a redução**. Gestão da Produção, São Carlos, v. 21, n. 2, p. 447-460, mar./2014.

PEREIRA, N.C. **Estudo da modificação de compostos de pp/epdm por radiação ultravioleta e radiação gama, utilizando como matérias-primas, polipropileno reciclado e resíduo de epdm coletados após processamento**. Dissertação. São Paulo, jul./2012.

PIGATTO, C. **Polipropileno e blendas PP/EPDM reforçadas com fibras curtas de sisal**. TESE DE MESTRADO. Programa de pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

PRABHAKARAN, S., *et al.* **Design and Fabrication of Composite Bumper for Light Passenger Vehicles**. International Journal of Modern Engineering Research (IJMER), INDIA, v. 2, n. 4, p. 2552-2556, jul./2012.

RABELLO, M.S. **ADITIVOS DE POLÍMEROS**. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2000. p. 211-223.

RABELLO, M.S., *et al.* **Aditivação de Termoplásticos**. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2013. p. 124-126.

REVISTA VEJA. **Montadoras cortam projeção de alta na produção de veículos para 2019**. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/economia/montadoras-cortam-projecao-de-alta-na-producao-de-veiculos-para-2019/>. Acesso em: 4 nov. 2019.

SANTANA, L.C. **Obtenção e caracterização de compósito de polipropileno reforçado com fibra de palmeira.** TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO. Graduação em Engenharia Química, Universidade de São Paulo, Lorena, 2014.

SANTOS, L. D. S. *et al.* **Estudo do efeito da adição de PP reciclado nas propriedades mecânicas e de escoamento de misturas de PP/EPDM.** Polímeros. Rio de Janeiro, v. 23, n. 3, p. 1-8, mai./2013.

SILVA, A. L. N. D. **COMPOSIÇÕES DE POLIPROPILENO HETEROFÁSICO E BORRACHA EPDM COM A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE POLIPROPILENO E ARTEFATOS: BR 10 2012 008692-1 A2.** PATENTE UFRJ. RIO DE JANEIRO, nov./2013.

SILVA, A.L.N., *et al.* **Some Properties of Polymers Blends Based on EPDM/PP.** BRAZIL PAPER. Rio de Janeiro, 1995.

SILVA, W.A., *et al.* **CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E TERMOELÁSTICA DE BLENDS DE PP VIRGEM/PP RECICLADO COM DESTINO À FABRICAÇÃO DE PARA-CHOQUES.** 23º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Foz do Iguaçu, 2018.

STRAPASSON, R. **Valorização do polipropileno através de sua mistura e reciclagem.** DISSERTAÇÃO. REPOSITÓRIO DIGITAL DA UFPR, CURITIBA, dez./2004. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/8788>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

TRIPATHI, D. **Practical Guide to Polypropylene**, India, ed. Rapra Technology, 2002.

WWF - WORLD WIDE FUND FOR NATURE. **Brasil é o 4º país do mundo que mais gera lixo plástico.** 03/2019. Disponível em: <http://https://www.wwf.org.br/?70222/Brasil-e-o-4-pais-do-mundo-que-mais-gera-lixo-plastico>. Acesso em 18 de novembro de 2019.

ZANIN, M., *et al.* **Resíduos Plásticos e Reciclagem – Aspectos gerais e tecnologia.** 1ª ed. São Carlos: Edufscar, 2009.

ZWEIFEL, H., *et al.* **PLASTICS ADDITIVES HANDBOOK.** 6. ed. ALEMANHA: HANSER PUBLICATIONS, 2009. p. 944-946.