

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

**ESTUDO SOBRE A VIABILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO DE
LOGÍSTICA REVERSA E RECICLAGEM DE POLÍMEROS NA
INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA**

LUIZ HENRIQUE MILARÉ MIETTO

SÃO CARLOS -SP
2023

ESTUDO SOBRE A VIABILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO DE LOGÍSTICA REVERSA E RECICLAGEM DE POLÍMEROS NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Carlos Henrique Scuracchio

São Carlos-SP
2023

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Ivana e Paulo, que puderam me proporcionar as melhores condições possíveis de educação, aprendizado e formação.

A minha família e amigos, que com seus conselhos e companhia, puderam tornar a minha jornada mais leve e prazerosa.

A minha namorada, Ana Beatriz, que me apoia em minhas decisões, me acompanha, e sempre está presente para comemorar cada uma de minhas conquistas.

A todos os membros da República Capô de Fusca que conviveram comigo durante a graduação, pelos momentos de descontração, desabafos, sinceras amizades e valiosos aprendizados.

AGRADECIMENTO

Ao professor Carlos Henrique Scuracchio, que me orientou durante a produção deste trabalho, sempre se dispondo a responder minhas dúvidas e inseguranças, e também por suas dicas valiosas, que permitiram que o trabalho tivesse maior objetividade.

À Universidade Federal de São Carlos, que me proporcionou os anos de mais aprendizado da minha vida, tanto no aspecto acadêmico quanto do lado pessoal, e também me expôs a experiências que contribuíram muito para minha formação.

RESUMO

O presente trabalho consiste em uma revisão bibliográfica acerca do tema de logística reversa aplicada aos principais polímeros da indústria automotiva. A logística reversa é um processo que visa a recuperação de produtos, materiais e componentes após o uso, com o objetivo de reintroduzi-los no ciclo produtivo ou destiná-los a outras finalidades, como a reciclagem, geração de energia ou até mesmo a produção de matéria prima para a fabricação de novos materiais.

A indústria automotiva é uma das mais expressivas indústrias do Brasil, porém também é responsável por diversos problemas ambientais, dentre eles, a geração de resíduos após o descarte de automóveis. Dos resíduos gerados, destacam-se os polímeros, que quando comparados com outros componentes e materiais, possuem um menor índice de reaproveitamento. Assim, a implementação da logística reversa dos materiais poliméricos pode contribuir para a redução do impacto ambiental causado pela indústria, além de gerar benefícios econômicos e sociais.

Dentre os principais desafios enfrentados na implementação da logística reversa em polímeros na indústria automobilística, destacam-se a complexidade da cadeia de suprimentos, dificuldade na adoção do processo de reciclagem, a falta de incentivos financeiros e a necessidade de investimentos em infraestrutura e tecnologia.

No entanto, a logística reversa pode trazer diversos benefícios para as empresas, como a redução de custos com aquisição de matéria-prima, a melhoria da imagem da empresa perante os consumidores e a sociedade, desenvolvimento de novos processos e tecnologias, e a geração de novas oportunidades de negócio.

Para implementar a logística reversa em polímeros na indústria automobilística, as empresas podem adotar diversas estratégias, como a recuperação de peças e componentes para reutilização, a reciclagem de materiais, a remanufatura de produtos e a venda de resíduos para outras empresas.

Com isso, o objetivo deste trabalho é se basear em cases bem estabelecidos de sustentabilidade relacionados a indústria automotiva, como a logística reversa de pneus e componentes metálicos, na procura de soluções voltadas à logística reversa de polímeros.

Com os resultados compilados pela pesquisa bibliográfica, conclui-se que

existe a possibilidade da utilização de uma parcela de material reciclado na fabricação de novos componentes, e até mesmo a utilização de alguns polímeros, principalmente poliolefinas, como fonte de energia. Apenas a implementação dessas práticas não solucionaria a problemática da logística reversa nesta indústria, porém elas podem servir como ponto de partida para futuros estudos acerca deste tema.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Destinos possíveis para pneus usados e inservíveis	18
Figura 2 - Esquema de um processo de pirólise de pneus inservíveis	19
Figura 3 - Monômero de Polietileno	34
Figura 4 - Monômero de Poliuretano	34
Figura 5 - Monômero de Policarbonato	34
Figura 6 - Monômero de PET	34
Figura 7 - Monômero de Polipropileno	34
Figura 8 - Monômero de Poliestireno	34
Figura 9 - Propriedades térmicas, físicas, elétricas e mecânicas do PEAD	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais polímeros por cada componente de um veículo padrão	07
Tabela 2 - Preço aproximado da sucata de materiais e componentes veiculares, com base em marketplaces	16
Tabela 3 - Densidade dos principais materiais veiculares e seus respectivos valores por m ³	16
Tabela 4 - Comparativo entre o valor da sucata e resinas virgens dos principais termoplásticos automotivos	17
Tabela 5 - Principais aspectos para aproveitamento energético dos polímeros abordados	20
Tabela 6 - Propriedades mecânicas obtidas em um ensaio de tensão em amostras de PVC virgem e reciclado	21
Tabela 7 - Principais propriedades observadas nos polímeros abordados, e percentual máximo de material reciclado utilizado sem impacto significativo nessas propriedades.	22
Tabela 8 – Principais propriedades físicas e mecânicas do Polipropileno	34
Tabela 9 – Principais propriedades físicas e mecânicas do PVC rígido	35
Tabela 10 – Propriedades físicas do PU.	36

LISTA DE SIGLAS

ABS - Acrilonitrila-Butadieno-Estireno
ASA - Acrilonitrila/Estireno/Acrilato
CETESB- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CNI - Confederação Nacional da Indústria
CO - Monóxido de Carbono
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
DFR - *Design for Recycling*
EPDM - Etileno-Propileno-Dieno
LR - Logística Reversa
MP - Material Particulado
NHMC - Hidrocarbonetos não metano
NOX - Óxidos de Carbono
OEM - *Original Equipment Manufacturer*
OICA - Organização Internacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
PA - Poliamida
PBT - Polibutileno Tereftalato
PC - Policarbonato
PE - Polietileno
PEBD - Polietileno de Baixa Densidade
PET - Polietileno Tereftalato
PIB - Produto Interno Bruto
PMMA - Polimetilmetacrilato
PNRS - Política Nacional dos Resíduos Sólidos
POM - Polioximetileno
PP - Polipropileno
PPE - Éter de polifenileno
PRAF - Programa de Renovação Acelerada da Frota
PS - Poliestireno
PU - Poliuretano
PVC - Policloreto de Vinila
SIGLA - Nome por extenso
SIGLA - Nome por extenso
SMA - Poli (anidrido maleico de estireno)
UV - Ultravioleta
VFV - Veículo em Fim de Vida

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 LOGÍSTICA REVERSA	3
2.2 LOGÍSTICA REVERSA NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA	4
2.3 MATERIAIS POLIMÉRICOS NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA.....	7
2.4 ESTRATÉGIAS E PRÁTICAS DE LOGÍSTICA REVERSA NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA.....	10
2.5 DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA A LOGÍSTICA REVERSA DE POLÍMEROS NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA	12
3 MATERIAIS E MÉTODOS	14
4 RESULTADOS	16
4.1 ASPECTOS ECONÔMICOS	16
4.2 POTENCIAL ENERGÉTICO.....	17
4.3 PROPRIEDADES	21
5 DISCUSSÃO	24
6 CONCLUSÕES	26
REFERÊNCIAS	28
ANEXO A – Estrutura e propriedades dos principais polímeros abordados	34

1 INTRODUÇÃO

No contexto atual, a sustentabilidade vem progressivamente ganhando relevância como um tema de interesse governamental, de empresas, da população e de organizações. Isso ocorre pois, com o aumento do aquecimento global, da poluição atmosférica, da diminuição da biodiversidade e demais questões ambientais, a sociedade tem se conscientizado da necessidade da adoção de práticas sustentáveis, dentre elas, o descarte inadequado de resíduos. Nesse contexto, a logística reversa também é um tópico que vem se tornando cada vez mais pertinente, pois apresenta uma possível solução para mitigar os impactos do descarte de resíduos sólidos ou líquidos.

A logística reversa é um processo que busca recuperar produtos, materiais e componentes após o uso, com o objetivo de reintroduzi-los no ciclo produtivo ou destiná-los a outras finalidades, como a reciclagem, geração de energia ou produção de matéria-prima para novos materiais. A abordagem desse tópico, enfatizando a produção de automóveis, é um tema de alta complexidade, uma vez que também envolve tópicos como economia circular, reciclagem, frota veicular, programa de renovação de frota, plásticos veiculares, indústria automobilística, dentre outros.

No entanto, apesar deste ser um tema de muita importância, o Brasil ainda é um país onde a prática ainda é pouco adotada, principalmente na indústria automobilística, que é uma das mais relevantes indústrias nacionais. No país, apenas 1,5% dos veículos são reciclados, o que significa que a grande maioria dos materiais utilizados na fabricação de automóveis é descartada de forma inadequada, causando impactos ambientais negativos. Com a comparação dos dados de reciclagem de veículos no Brasil e em outros países, da identificação de melhores práticas e estratégias que podem vir a aumentar esse índice, bem como a comparação com práticas sustentáveis adotadas em outros componentes de automóveis, como pneus e peças metálicas, é evidente a necessidade em buscar soluções para a implementação efetiva da logística reversa de carros no Brasil.

Diante disso, este trabalho enfatiza a adoção dessa prática aos principais polímeros utilizados em automóveis, uma vez que são os materiais de menor interesse no processo de coleta, já que possuem menor valor em relação à sua

densidade quando comparados aos metais ou outros componentes. O objetivo do trabalho é contribuir para o debate sobre a logística reversa na indústria automotiva, apresentando informações relevantes e atualizadas sobre o tema por meio da pesquisa bibliográfica, da compilação de resultados e dados de outros trabalhos. Além disso, sabendo que apenas a adoção dessa prática não é capaz de solucionar os demais problemas ambientais associados à indústria, o trabalho também propõe, a partir das informações apresentadas, a elaboração de novos estudos que possam mostrar qual a situação atual do país em relação à reciclagem de automóveis ou apresentar novas propostas para a adoção de práticas sustentáveis por essa indústria.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 LOGÍSTICA REVERSA

A logística reversa (LR) consiste no retorno de produtos ao seu fabricante, podendo esse retorno ser realizado pós consumo, ou seja, em produtos que já foram utilizados pelo consumidor final, podendo apresentar desgaste e defeitos, e também em produtos de pouco ou nenhum uso, cujo exemplo podem ser devoluções feitas pelos clientes ao fabricante (LEITE, 2005).

Nos últimos anos, essa dinâmica tem experimentado um aumento significativo, principalmente devido à tendência do mercado em produzir uma variedade cada vez maior de produtos segmentados. Isso resulta em ciclos de vida mais curtos para os produtos, à medida que novos modelos e versões são lançados, tornando rapidamente obsoletas as versões anteriores (LEITE, 2017). Nesse contexto, a logística reversa assume dois aspectos principais: capturar valor, uma vez que a adoção de processos de logística reversa podem gerar ganhos significativos para as empresas, especialmente aquelas cujos produtos possuem alto valor agregado ou que apresentam altos índices de retorno; e o aspecto ecológico, permitindo a designação de novas funcionalidades, aplicações, reprocessamento ou descarte adequado dos produtos em questão (ROGERS e TIBBEN-LEMBKE, 1998).

É importante ressaltar que, no cenário atual, a implementação de sistemas sustentáveis tem ganhado cada vez mais relevância. Temas como economia circular começaram a ser discutidos de forma mais ampla a partir da década de 2010, com destaque para a série de relatórios “Em direção a uma economia circular”, publicados pela Ellen MacArthur Foundation em 2012 (AZEVEDO, 2015, p.1), sendo a Logística Reversa um dos princípios fundamentais da economia circular.

No Brasil, a LR passou a chamar a atenção das empresas não apenas pelas vantagens econômicas e ecológicas, mas também devido à implementação da Política Nacional dos Resíduos Sólidos em 2010, instituindo formas de incentivo financeiro para estimular práticas sustentáveis, responsabilização dos geradores de resíduos, e implantação da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, sendo esta definida como:

conjunto de atribuições individualizadas e encadeadas dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, dos consumidores e dos titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, para minimizar o volume de

2.2 LOGÍSTICA REVERSA NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

A indústria automobilística desempenha um papel de destaque na economia global, sendo um setor de grande importância econômica e social. Segundo a OICA (Organização Internacional dos Fabricantes de Veículos Automotores), o Brasil é o 8º maior produtor de veículos no mundo, com mais de 2,35 milhões de unidades produzidas no ano de 2022, o que representa 2,79% do total global no ano (OICA, 2023). De acordo com relatório publicado pelo CNI (Confederação Nacional da Indústria), a produção de veículos automotores representou 2,71% do PIB (Produto Interno Bruto) da indústria brasileira no ano de 2020, totalizando cerca de R\$40,2 bilhões (CNI, 2023). Além disso, a indústria automotiva desempenhou um papel significativo na geração de empregos, sendo responsável por mais de 412 mil empregos formais em 2020, subindo para 425 mil ocupações em 2021, ano em que representou 4,12% dos empregos formais no país (CNI, 2023).

Além da relevância econômica e geração de empregos, a indústria automobilística também contribui para o desenvolvimento tecnológico do país. No entanto, junto destes benefícios, essa indústria também enfrenta desafios ambientais e a necessidade de adotar práticas sustentáveis.

Os desafios ambientais do setor são decorrentes de diversas atividades ao longo do ciclo de vida dos veículos, sendo que o impacto ambiental é notado em cada uma das etapas de seu ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas, passando pela logística de suprimentos, a produção, a distribuição para o mercado consumidor, sua vida útil, até a fase de descarte. Em cada uma dessas etapas, podem ser identificados o consumo de recursos naturais, a emissão de gases tóxicos e gases de efeito estufa, a poluição do ar e do solo, bem como a geração de resíduos sólidos.

Dados da CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) calculam que, apenas no estado de São Paulo, em 2021, foram emitidos “258 mil toneladas de CO, 57 mil de NMHC, 151 mil de NOX, 3,6 mil de MP, 2 mil de SO2 e 1,6 mil de aldeídos” (CETESB, 2022).

Um fator importante para a geração de resíduos sólidos plásticos pós consumo é a quantidade desse material presente em cada veículo, em média, 15% A 20% do

peso dos veículos são compostos de polímeros (SAKURAMOTO apud SANT ANNA, 2020), sendo que, no Brasil, apenas 1,5% da frota de carros antigos (ou seja, já abandonados em ferros-velhos) passa pelo processo de reciclagem (CILO, 2019).

No que diz respeito aos pneus, eles podem representar até 4,38% do peso de um veículo popular - considerando que cada pneu tem aproximadamente 10,5 kg de massa (ODA e JÚNIOR, 2001) e que um carro popular de pequeno porte pode pesar 960 kg (WIEDER, 2022). Além disso, no ano de 2022, foram registradas mais de 56 milhões de unidades de pneu vendidas no Brasil. Considerando o período de 2016 a 2022, há uma média de 57 milhões de unidades por ano (ANIP, 2023), representando um grande potencial para o reaproveitamento desses produtos na indústria da borracha. O reaproveitamento e reciclagem de pneus já é um processo bem estabelecido no Brasil, uma vez que a legislação sobre a destinação desses produtos é bem consolidada, e eles também possuem várias formas de destinação final, como o reuso, a reforma, reutilização, recuperação e até mesmo a pirólise, que permite a obtenção de energia e gera outros subprodutos (MOTTA, 2007).

Por último, o consumo de óleos lubrificantes atingiu a marca de 1,2 milhão de metros cúbicos vendidos no ano de 2016 (FECOMBUSTIVEIS, 2017), representando um alto potencial de poluição, uma vez que esses produtos são considerados perigosos, contendo em sua composição muitas substâncias tóxicas e cancerígenas, principalmente após a sua utilização, degradação ou eventual combustão (COMPER, SOUZA e CHAVES, 2016, p. 133).

Diante desses fatos, a logística reversa desempenha um papel crucial na gestão dos resíduos e peças automotivas e na busca por soluções sustentáveis. No caso da indústria automobilística, a logística reversa abrange desde a recuperação de materiais valiosos presentes nos veículos até a gestão adequada de peças descartadas e dos resíduos provenientes de sua produção e utilização.

Várias práticas de logística reversa têm sido implementadas com sucesso na indústria automobilística. Um exemplo é a remanufatura de componentes, em que peças usadas são recuperadas, recondiçionadas e reintegradas em novos produtos, reduzindo a necessidade de produção de peças totalmente novas. Nos Estados Unidos, a indústria da remanufatura já chegou a atingir a marca de US\$53 bilhões por ano, dos quais 70% são provenientes do setor automobilístico (SIMITH, KEOLEIAN apud MAEDA, 2021, p. 13). Caso essa realidade fosse trazida para o Brasil, a

indústria de remanufatura poderia representar um percentual significativo da própria indústria automobilística. Além disso, a reciclagem de plásticos como os Polipropilenos, Policarbonatos e o PET, principais polímeros presentes em veículos, pode ser amplamente adotada, permitindo a sua reintegração na cadeia produtiva e evitando o descarte em aterros ou incineração. O Polipropileno reciclado, por exemplo, pode apresentar um teor de até 30% em misturas com o PP virgem sem impactar as propriedades mecânicas de peças automotivas (FERNANDES, 2007). Blendas de PC e PET reciclado também já possuem aplicações automotivas. A empresa SABIC, por exemplo, já comercializa materiais dessas blendas com até 29% de material reciclado (SABIC, 2021). É importante ressaltar a dificuldade na reciclagem de peças transparentes utilizadas na indústria, como resinas de policarbonatos componentes de para-brisas, uma vez que essas resinas estão sujeitas ao amarelamento sob seu reprocessamento.

Outra prática destacada é a coleta de óleo lubrificante. No Brasil, essa prática é bem estabelecida principalmente nas regiões Sul e Sudeste, com um percentual de coleta de 45% e 48%, respectivamente, para o ano de 2021. Esse percentual cai para 39% na região Centro-Oeste e 38% para Norte e Nordeste, sendo a média total para o território brasileiro de 44% (CONAMA, 2022, p.3). Esses Dados são otimistas, uma vez que apresentam um aumento em relação a anos anteriores, ainda que existam desafios regulatórios, logísticos, econômicos e tecnológicos para a consolidação desta prática (COMPER, SOUZA e CHAVES, 2016, p.149).

É importante ressaltar que, para a efetiva implementação da logística reversa em qualquer indústria, inclusive na automotiva, é necessário um esforço conjunto de fabricantes, consumidores, órgãos reguladores e demais stakeholders. Iniciativas de conscientização, investimentos em infraestrutura e parcerias entre diferentes setores são fundamentais para superar os desafios e promover uma gestão adequada dos resíduos automotivos (LEITE, 2017).

Nesse sentido, a logística reversa na indústria automobilística desempenha um papel fundamental na busca por soluções sustentáveis, econômica e ecologicamente, contribuindo para a redução do impacto ambiental e o aproveitamento de recursos valiosos. A implementação eficaz da logística reversa não apenas reduz os impactos negativos do setor automobilístico, mas também cria oportunidades de negócios, promovendo a economia circular e impulsionando a sustentabilidade na indústria.

2.3 MATERIAIS POLIMÉRICOS NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

Na indústria de automóveis, os materiais poliméricos desempenham um papel fundamental devido às suas propriedades versáteis e características desejáveis. Os polímeros são compostos por cadeias moleculares longas e são amplamente utilizados na fabricação de veículos devido à sua leveza, resistência mecânica, capacidade de absorção de impacto, durabilidade, baixo custo de produção, facilidade de moldagem, capacidade de aditivação e reciclabilidade. Dentre os principais polímeros utilizados na indústria automobilística, o Polipropileno (PP), Poliuretano (PU) e o Policloreto de Vinila (PVC) são responsáveis por cerca de 66% do volume de plásticos utilizados em carros, porém são utilizados diversos polímeros na fabricação de veículos, dentre eles o Policarbonato (PC), Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (ABS), Poliamidas (PA), Poliestireno (PS), Polietileno (PE), Polioximetileno (POM), Acrílico (PMMA), Polibutileno Tereftalato (PBT), Acrilonitrila/Estireno/Acrilato (ASA) (PATIL et al, 2016), blendas de Polipropileno/Etileno-Propileno-Dieno (PP/EPDM), Policarbonato/Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (PC/ABS) e Policarbonato/Polibutileno-Tereftalato (PC/PBT) (BRÁS, 2011).

Tabela 1 - Principais polímeros por cada componente de um veículo padrão

Componente	Principais Plásticos Utilizados	Percentual Médio Sobre o Total de Plásticos (%)
Pára-Choques	PP, ABS, PC/PBT	9,5
Assentos	PU, PP, PVC, ABS, PA, PET	12,4
Painel	PP, ABS, SMA, PPE, PC	6,7
Sistemas de Combustível	PEBD, POM, PA, PP, PBT	5,7
Carroceria (Incluindo painéis)	PP, PPE	5,7
Componentes sob o capô	PA, PP, PBT	8,6
Acabamento interior	PP, ABS, PET, POM,	19,0

	PVC	
Componentes elétricos	PP, PE, PBT, PA,	6,7
	PVC	
Acabamento exterior	ABS, PA, PBT, POM,	3,8
	ASA, PP	
Iluminação	PC, PBT, ABS,	4,8
	PMMA	
Estofamento	PVC, PU, PP, PE	7,6
Reservatórios de líquidos	PP, PE, PA	1,0
Outros	-	8,5
Total	-	100,0

Fonte: Adaptado e traduzido de Patil et al, 2017, p.3809.

Os polímeros são amplamente empregados em várias partes dos veículos, de acordo com as suas propriedades específicas e capacidade de atender aos requisitos de desempenho de cada aplicação. Para o acabamento interior, por exemplo, alguns aspectos devem ser valorizados: em partes que ficam expostas à luz do sol, deve existir uma resistência ao UV tal que o material mantenha suas propriedades visuais ao longo do tempo de uso do carro. Além disso, o material deve ter boas propriedades acústicas, sendo capaz de absorver os ruídos advindos do motor e da suspensão. Pensando na segurança que esses componentes devem ser capazes de fornecer no caso de um eventual acidente, propriedades mecânicas como resistência, rigidez e capacidade de absorção de impacto também são de grande importância (ELLIOT, 1992). No acabamento interior, os principais polímeros utilizados são PU, PP, ABS, PET, POM e PVC (PATIL et al, 2017).

Para os assentos, o apelo visual e conforto apresentam maior importância. Tanto para assentos com aparência de espuma quanto de couro, os materiais mais utilizados são PU e PET (neste caso, as fibras de PET podem ser misturadas com algodão nos chamados poliésteres) (ELLIOT, 1992), mas também podem ser utilizados PP's, PVC, ABS e PA. O PU também pode ser utilizado no volante, dando o aspecto de couro, e também sendo utilizado junto ao ABS. (PATIL et al, 2017).

Em componentes transparentes onde a resistência mecânica é mais

explorada, como faróis e para-brisas, o PC é o material mais comumente utilizado, quando pigmentado, o PC também pode ser utilizado em partes do revestimento exterior, como portas, porta-malas e teto. Já em componentes menos exigidos mecanicamente e onde o aspecto visual não é tão valorizado, como painéis e a parte interior dos faróis, pode ser utilizado o PMMA (PATIL et al, 2017).

Nas partes externas, a utilização de plásticos irá priorizar novamente a resistência mecânica, com o objetivo de aumentar a segurança dos veículos. Nos para-choques, são adotados PS, PBT, blendas de PC/PBT e PP reforçado com fibra de vidro. Já para o acabamento, podem ser utilizados ABS, PA, PBT, POM, ASA ou PP (PATIL et al, 2017).

Diante da variedade de materiais utilizados, a dificuldade em se implementar a logística reversa de forma integral na indústria de automóveis se dá pela complexidade na classificação dos diferentes tipos de polímeros presentes nos veículos, não só por existir uma grande variedade de polímeros nessa indústria, mas também pela possível utilização de blendas e da aditivação em diferentes concentrações. Além disso, as propriedades de cada componente são muitas vezes indispensáveis, o que dificulta o reprocessamento e reciclagem desses materiais, já que suas propriedades se deterioram a cada ciclo de reprocessamento.

No entanto, a recuperação e reciclagem de polímeros também apresentam oportunidades promissoras para a indústria automobilística. A reciclagem de polímeros permite a redução do consumo de matérias-primas não renováveis, economia de energia e emissões de gases de efeito estufa, além de contribuir para a economia circular e a sustentabilidade ambiental (SIQUEIRA, 2015, p. 742).

Em vista dessas oportunidades, várias iniciativas de reciclagem de polímeros já têm sido implementadas na indústria automobilística. Um exemplo é a reciclagem de para-choques de polipropileno. A reciclagem desse componente é facilitada pois sua composição não possui outros polímeros, e ele pode ser convertido em grânulos de polipropileno reciclado para produção de novos para-choques ou outros componentes automotivos. Na produção de para-choques, é comum se utilizar mistura de PP virgem com até 10% de PP reciclado, porém é possível utilizar até 30% do material reciclado sem que as propriedades mecânicas do componente se deteriore (FERNANDES, 2007).

Outra iniciativa é a reciclagem de PA6, presente em airbags. Para esse

componente, é adotada a reciclagem química, que quebra as cadeias moleculares do polímero em monômeros, permitindo a produção de PA6 reciclada, com propriedades similares às da PA6 virgem, porém com um custo e consumo de energia menores durante sua produção (MALAGUETA, 2003).

Um desafio característico de partes com muitos componentes, como o painel de bordo, é a diversidade de peças e materiais utilizados em sua montagem, o que faz com que a sua desmontagem seja demorada e não resulte em uma quantidade significativa de cada material utilizado, o que na maioria das vezes não justifica economicamente a sua reciclagem (MALAGUETA, 2003).

É importante ressaltar que a implementação efetiva da logística reversa de polímeros automotivos requer parcerias entre fabricantes de veículos, fornecedores de materiais (nos casos em que a reciclagem física for viável), indústria química (em casos onde for necessária a reciclagem química), empresas de reciclagem e órgãos reguladores. Além também de incentivos governamentais para que veículos em fim de vida sejam entregues para reciclagem, permitindo a renovação da frota (GOMES, 2001).

2.4 ESTRATÉGIAS E PRÁTICAS DE LOGÍSTICA REVERSA NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

A implementação bem-sucedida da logística reversa na indústria automobilística requer a criação de modelos de negócio sustentáveis e parcerias eficientes entre diversos atores da cadeia automotiva. Conforme a legislação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, o ciclo de vida dos produtos e componentes automotivos é de responsabilidade compartilhada de cada um dos atores dessa cadeia, desde os produtores de matéria-prima até o consumidor final, e a criação de uma rede de recuperação e reciclagem de materiais mais eficiente para o estabelecimento da logística reversa é parte crucial para o cumprimento da responsabilidade compartilhada.

Tratando-se dos consumidores, é necessário criar formas de conscientização para que estes tenham conhecimento dos riscos de se manter um veículo em fim de vida (VFV). No Brasil, em 60% dos acidentes há um veículo com mais de 10 anos envolvido (GOMES, 2001), sendo que, no ano de 2022, aproximadamente 49,4% da

frota possuía 11 anos ou mais (SINDIPEÇAS, 2023). Além disso, também é necessário que haja formas de incentivar a renovação da frota, bem como a destinação correta dos VFV's para que os mesmos retornem ao início da cadeia produtiva. Existem Programas de Renovação Acelerada da Frota (PRAFs) já implementados em países como Estados Unidos, Alemanha e França, e os resultados desses programas se mostram promissores não só para a designação correta dos VFV's, mas também por movimentar a indústria e pela redução na emissão de gases, que costuma ser maior para veículos mais antigos (LINDAU et al, 2015).

Tendo a designação correta dos VFV's, é papel das empresas de reciclagem realizar a classificação dos veículos de acordo com seu tipo e idade, então, deve ser realizada a despoluição desse veículo, ou seja, a remoção de todos os seus fluídos de forma adequada, sendo possível nessa etapa dar o destino adequado aos fluidos tóxicos e também aos recuperáveis, como o óleo lubrificante. Então, pode ser feita a desmontagem do veículo, na qual alguns dos componentes poderão ser reutilizados de forma integral, a depender de sua condição, ou então receberão o tratamento de sucata, sendo trituradas e separadas (MEDINA, 2003). Um dificultador na inserção dos polímeros no ciclo de logística reversa reside não só na baixa representatividade de peso desses materiais quando comparados a massa total dos veículos, mas também no baixo valor econômico dos polímeros, quando comparados aos metais, o que faz com que na maioria das vezes estes sejam encaminhados para aterros. Com a evolução tecnológica dos polímeros e a tendência de aumento do percentual de plásticos nos veículos ao longo dos anos, torna-se necessário a criação de legislações e incentivos para a reciclagem efetiva de plásticos veiculares (SCHULTMANN et al, 2005).

Aos fornecedores de matéria prima e montadoras, a responsabilidade reside no desenvolvimento sustentável de novos polímeros, isso é, devem ser desenvolvidas peças com as propriedades de engenharia desejadas, com composição conhecida e sem componentes tóxicos, e também com materiais passíveis de serem reciclados. Existem mais de 15.000 peças e cada veículo produzido (CASTRO, 2012), e é possível que existam diversos polímeros em sua composição, sendo assim, as produtoras devem ser responsáveis, na construção do *design* de um veículo, por projetá-lo de forma a facilitar a reinserção dos seus componentes numa cadeia produtiva, uma possível solução para isso, já implementada no mercado europeu, é

a identificação química de cada uma das partes do automóvel e a inserção dessas informações num banco de dados, além do registro dos materiais utilizados em cada novo projeto (MEDINA, 2003), essa documentação pode vir a facilitar o trabalho das empresas de reciclagem no processo de desmontagem, separação e identificação de componentes, permitindo que estes possam ter a destinação correta. Um outro aspecto que pode ser explorado no *design* de peças pensando no seu destino final é a especificação não só da montagem, como também da desmontagem de componentes, processo chamado de *Design for Recycling* (DFR) (MALAGUETA, 2003).

Por último, é crucial a participação dos órgãos públicos, não só fiscalizando a cadeia de logística reversa em cada uma das etapas citadas acima, conforme rege a PNRS (RIBEIRO, 2018), mas também atuando de forma ativa na colaboração desse sistema. Por exemplo, é responsabilidade dos departamentos de trânsito realizar a apreensão de veículos irregulares e manter desses veículos em seus pátios. Muitas vezes, principalmente para veículos antigos, é comum que o proprietário não realize a regularização desse veículo e não se interesse por seu resgate, o que torna o automóvel um VFV, podendo permanecer por tempo indeterminado no pátio do departamento de trânsito. Os órgãos competentes devem ser responsáveis por examinar esses casos, identificando VFV's e encaminhando-os para o descarte apropriado, onde eles terão a designação correta feita pelas empresas de reciclagem (CASTRO, 2012), o mesmo ocorre em delegacias de polícia, empresas de transporte e locadoras de automóveis.

2.5 DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA A LOGÍSTICA REVERSA DE POLÍMEROS NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

De maneira geral, o principal desafio da logística reversa reside em sua complexidade, envolvendo processos de transporte, armazenamento, desmontagem, recuperação e administração de informações. Nos Estados Unidos, existem empresas especializadas que desenvolvem sistemas para a gestão de Logística Reversa (KRUMWIEDE, 2002), além de ser comum encontrar trabalhos acadêmicos propondo a terceirização dessa atividade, como o de (MAHMOUDZADEH, et al, 2012) que realiza um estudo sobre a terceirização do setor no Irã. Além disso, também existem conteúdos propondo modelos matemáticos de otimização de custos e

distâncias durante o transporte dos VFV's, generalizando a situação e tratando-a como o Problema do Caixeiro Viajante (CHAABANE, et al, 2020).

Outra dificuldade, já mencionada, reside na dificuldade de identificar e separar os materiais plásticos de veículos, que pode futuramente ser contornada através da catalogação e identificação da composição de cada peça pelos fabricantes já desde início do projeto de um veículo. Essa dificuldade também pode ser superada com o desenvolvimento de novas técnicas de reciclagem, que vem sendo observadas principalmente em pneus e plásticos (MEDINA, 2003), ou na procura de alternativas no destino desses materiais, que podem ser designados para aplicações menos nobres que as iniciais.

Além disso, talvez o principal fator de influência sobre o baixo índice de reciclagem dos materiais plásticos veiculares quando comparados com os metais seja seu baixo peso e baixa rentabilidade. Sendo assim, é necessário procurar formas de relacionar essa prática com outras já bem estabelecidas no mercado e na indústria. Olhando especificamente para a indústria automobilística, a reciclagem de pneus, óleos, baterias e partes metálicas já possui um maior índice que o de peças plásticas, e através do estudo desses processos mais bem estabelecidos, pode ser possível encontrar formas de alavancar a reciclagem de plásticos veiculares. Já no caso específico do Brasil, que recicla apenas 1,5% de seus carros antigos e inutilizados, é possível se inspirar em países como Dinamarca, Suécia e Noruega, cujo índice é de 100% (CILO, 2019).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho, foi adotada uma abordagem de pesquisa bibliográfica. A coleta de informações e dados foi realizada através da busca de artigos, revisões, periódicos, revistas, jornais e monografias em fontes acadêmicas e científicas disponíveis em plataformas confiáveis como Google Scholar, SciELO, ScienceDirect e Periódicos Capes. Além disso, também foram utilizadas notícias, para a obtenção de alguns dados específicos e atualizados, sites de *marketplace*, para pesquisa de preços, legislações, documentos oficiais e relatórios técnicos, obtidos em publicações de Sindicatos, Órgãos Governamentais, Federações e Associações Comerciais. Todas as fontes utilizadas foram devidamente citadas e referenciadas neste trabalho, de acordo com as normas acadêmicas estabelecidas.

Para a realização da pesquisa, foram utilizadas palavras-chave para os temas relevantes abordados neste trabalho, alguns dos principais exemplos são: “Economia Circular”; “Logística Reversa”; “Reciclagem”; “Frota Veicular”; “Programa de Renovação de Frota”; “Plásticos Veiculares”; “Indústria Automobilística”, além de variações que permitissem direcionar melhor a pesquisa, procurando por dados estatísticos, ou informações acerca da composição de veículos e de como funciona a cadeia de logística reversa dessa indústria. As pesquisas foram realizadas tanto em português quanto em inglês, permitindo uma maior variedade de fontes e obtenção de informações atualizadas.

A compilação de resultados se deu por meio da análise de dados de reciclagem de materiais automobilísticos no Brasil, bem como em outros países onde essa prática é mais bem estabelecida. A partir dessas informações, foram realizadas comparações entre as diferentes realidades e estratégias adotadas para a logística reversa no setor automotivo em cada localidade.

Além disso, foram comparados dados específicos de reciclagem de plásticos automotivos com a reciclagem de pneus, baterias, metais e óleos que são componentes com maior índice de reciclagem e com uma cadeia de logística reversa mais bem estruturada. Essa análise permitiu uma compreensão mais abrangente das práticas de recuperação e reaproveitamento de materiais na indústria automobilística.

Por fim, vale ressaltar que a abordagem da pesquisa bibliográfica e a comparação de dados permitiram uma análise abrangente sobre o tema da logística

reversa na indústria automobilística, aplicada a componentes plásticos, fornecendo uma visão ampla das práticas, desafios e oportunidades nesse campo.

4 RESULTADOS

4.1 ASPECTOS ECONÔMICOS

A tabela 2 mostra os principais materiais e componentes presentes em veículos e os preços aproximados de sua sucata. Os preços são estimados com base em dados de diversos *marketplaces* e compradores, já que não existe uma padronização desses preços.

Tabela 2 - Preço aproximado da sucata de materiais e componentes veiculares, com base em *marketplaces*

Material	Valor (R\$/kg)
Aços (diversas ligas)	5,00 – 5,85
Alumínio	5,30 – 9,00
Ferro (diversas ligas)	0,80 – 1,00
Bateria 60 ah	35,00 (a unidade)
Pneu	0,50 – 1,50
ABS	0,55 – 0,60
PA 6/PA 66	9,70
PVC	0,40 – 0,50
PP	0,40 – 0,50
PU	0,24 – 0,30
PEBD	1,00 – 1,10
PET	1,00 – 1,10

Fonte: Autoria própria, dados extraídos de *marketplaces*

Na tabela 3, são apresentadas as densidades desses materiais, e seus respectivos preços por volume, de acordo com os dados apresentados na tabela 2

Tabela 3 - Densidade dos principais materiais veiculares e seus respectivos valores por m³

Material	Densidade média kg/m³	Valor (R\$/m³)
Aços (diversas ligas)	7.860	39.300,00 – 45.981,00
Alumínio	2.697	14.294,10 – 24.273,00

Ferro (diversas ligas)	7.874	6.299,20 – 7.874,00
ABS	1.040	572,00 – 624,00
PA 6/PA 66	1.130	10.961,00
PVC	1.400	560,00 – 700,00
PP	900	360,00 – 450,00
PU	1.250	300,00 – 375,00
PUR	32	7,68 – 9,60
PEBD	920	920,00 – 1.012,00
PET	1.360	1.360,00 – 1.496,00

Fonte: Autoria própria

Na tabela 3, encontram-se os preços das resinas plásticas virgens desses principais materiais. Novamente, os preços apresentados tem como base a busca em *marketplaces* e por isso são dados estimados.

Tabela 4 – Comparativo entre o valor da sucata e resinas virgens dos principais termoplásticos automotivos

Material	Preço (R\$/kg)
ABS	25,00 – 35,00
PA 6/ PA 66	8,00 – 15,0
PVC	5,00 – 12,00
PP	50,00 – 60,00
PU	13,00 – 25,00
PEBD	5,50 – 9,00

Fonte: Autoria própria

4.2 POTENCIAL ENERGÉTICO

Um fator de importância quando comparamos os termoplásticos com os outros materiais é a reciclabilidade. Para metais, existem meios viáveis para a separação dos componentes de liga para seu futuro reprocessamento, e esses materiais podem

ser reprocessados sem a perda de suas propriedades. Para os pneus, compostos por termorrígidos, existem diversas opções de destinação, ilustradas pela figura 1.

Figura 1 - Destinos possíveis para pneus usados e inservíveis

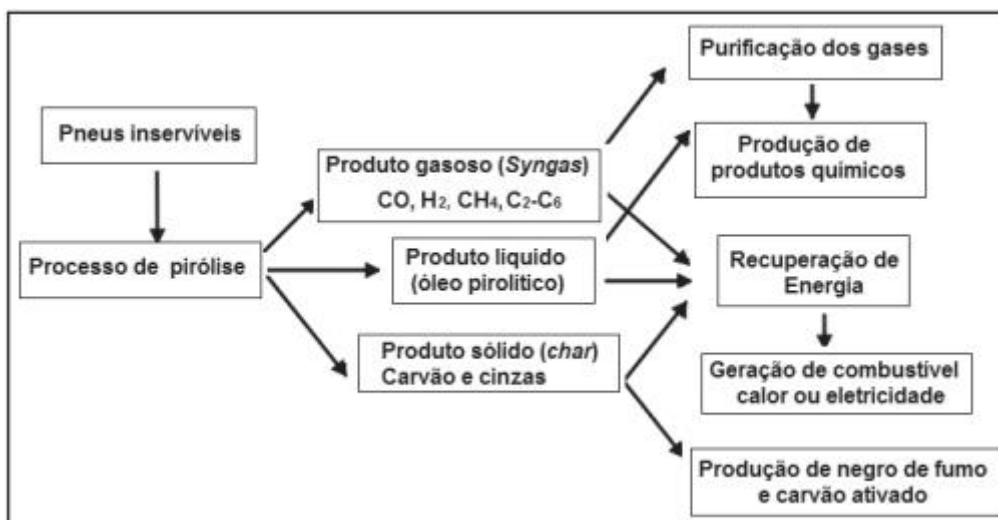


Fonte: Faria apud Motta (2007)

Segundo os dados apresentados, datados a 2006, 36,9% dos pneus usados são designados para o reuso e 9% são reformados, sendo que o reuso depende das condições em que o material se encontra após o descarte, e a reforma é possível devido à estrutura dos pneus, que permite que seja realizada a reforma de sua última camada. Esses processos também são viáveis pois o fator visual não é determinante para o consumo de pneus.

O restante dos 53,2% dos pneus utilizados podem possuir diversos destinos, dentre ele a recuperação dos materiais, pela produção de outros produtos como asfalto, borracha, Concreto DI®, e outros, ou para a obtenção de energia através da queima (MOTTA, 2007). Pelo processo de pirólise, também é possível obter diversos subprodutos, que podem ser utilizados na produção de outros produtos químicos ou obtenção de energia (SCHWALM et al, 2020). A figura 2 ilustra os subprodutos da pirólise de pneus.

Figura 2 - Esquema de um processo de pirólise de pneus inservíveis



Fonte: Schwalm et al (2020)

Essa variedade de subprodutos se deve à complexidade da composição dos pneus, e a maioria dos subprodutos possuem grande potencial de utilização como fonte de energia. O *char*, conhecido como carvão pirolítico, possui um poder calorífico de 25 a 34 MJ/kg, além de poder ser utilizado como negro de fumo (apesar de possuir maiores concentrações de impurezas inorgânicas que o negro de fumo virgem), ou carvão ativado. Já o Syngas pode apresentar um poder calorífico de mais de 45 MJ/kg, comparável ao gás natural. O óleo pirolítico possui uma composição mais complexa, e pode apresentar o poder calorífico de 28 a 46 MJ/kg, mas é importante observar que devido à alta concentração de enxofre, esse subproduto deve passar pelo processo de dessulfurização. Alguns compostos do óleo pirolítico também podem ser utilizados como matéria-prima na indústria química (SCHWALM et al, 2020).

A produção de óleo de pirólise a partir de outros termoplásticos também é viável. A pirólise de PP pode produzir óleo com um rendimento de até aproximadamente 85% da massa de material plástico (CROTTI, 2018), em condições experimentais, o óleo pirolítico de PP produzido a partir de rótulos e tampas de garrafa pode chegar a um poder calorífico de quase 45 MJ/kg, sendo equiparável ao poder calorífico da gasolina, e possuindo menores teores de enxofre (KAHLOW, 2007), é importante ressaltar que esse material pode possuir diferenças em relação ao PP veicular, uma vez que a composição deste muitas vezes possui fibra de vidro, aditivos e outras resinas, apesar de existirem estudos indicando a viabilidade de produção de

óleos a partir de blendas de PP/EPDM com um rendimento de até 93,5% (BRÁS, 2011). Além disso, as pirólises tanto do polipropileno quanto do polietileno também geram subprodutos que podem ser utilizados pela indústria química (FERREIRA, 2021).

No caso do PVC, é possível realizar a pirólise, com aproximadamente 65% da massa sendo convertida em componentes gasosos, 23% em óleos, 10% em sólidos e os 2% restantes em resíduos, sendo que o óleo de pirólise contém concentrações significativas de compostos aromáticos e cloro. Já no caso do ABS, 85% de sua massa pode ser convertida em óleo, cuja composição possui quantidades significativas de compostos nitrogenados, 8% em gases e 6% em sólidos, sendo o 1% restante em resíduos (JÚNIOR, 2017).

Já para a pirólise de PU, a composição de seus óleos pirolíticos contém diversos componentes tóxicos, como o benzeno, tolueno, monóxido de carbono, cianeto de hidrogênio, acetonitrila, acrilonitrila, propanonitrila e vinilacetona (SALAZAR, CARASCHI, LEÃO, 2000).

Abaixo, na tabela 5 são listados os principais aspectos energéticos dos polímeros abordados, como poder calorífico, rendimento de conversão em óleo, Presença de substâncias tóxicas ou perigosas e outras aplicações.

Tabela 5 - Principais aspectos para aproveitamento energético dos polímeros abordados

Material	Poder calorífico (MJ/kg)	Rendimento (%)	Substâncias tóxicas ou perigosas	Outras aplicações
Char de pneus	25-34	-	-	Negro de fumo, carvão ativado
Syngas	>45	-	-	-
Óleo pirolítico de pneus	28-46	-	Compostos de enxofre	Matéria prima para indústria química
Óleo pirolítico de PP	45	-	Compostos de enxofre (baixa concentração)	Matéria prima para indústria química
Óleo pirolítico	-	93,5	-	Matéria prima para

de PP/EPDM				indústria química
Óleo pirolítico de PVC	-	23	Compostos aromáticos e clorados	-
Óleo pirolítico de ABS	-	85	Compostos nitrogenados	-
Óleo pirolítico de PU	-	-	Benzeno, Tolueno, CO, HCN, outros	-

Fonte: Autoria própria (2023).

4.3 PROPRIEDADES

Como já destacado neste trabalho, é possível utilizar um percentual de até 30% de PP reciclado para aplicação em para-choques sem a perda das propriedades mecânicas (FERNANDES, 2007).

O ABS, também presente em para-choques, painéis e componentes externos, muito utilizado em blendas PC/ABS, também é um material cuja resistência mecânica é importante, porém o reprocessamento desse material pode prejudicar significativamente suas propriedades mecânicas, como a resistência ao impacto. Análises experimentais indicam que, em blendas PC/ABS com 70% de ABS e 30% de PC, apenas 2% de material reciclado pode ser utilizado sem prejudicar as propriedades mecânicas (CÂNDIDO, 2011).

Já para as blendas de PC/PBT, utilizadas em aplicações de alto desempenho, que exigem boa resistência química, térmica e mecânica. Análises em blendas de Xenoy® de PC/PBT indicam que o reprocessamento de peças envelhecidas possui um grande potencial de aplicação industrial, uma vez que após o reprocessamento, com ou sem a adição de pigmento, a camada degradada de peças envelhecidas se dilui, recuperando propriedades como alongamento na ruptura, resistência ao impacto e resistência ao amarelamento (SANCHEZ, 2003).

As propriedades mecânicas do PVC reciclado mecanicamente e reprocessado, em ensaios de tração, são próximas às do PVC virgem, principalmente a tensão até a ruptura e o módulo de elasticidade, sendo que estas não apresentam diferenciação

estatística significativa entre o polímero reciclado e o polímero virgem. Já as tensões máxima, de escoamento e de ruptura apresentam essa diferenciação, porém ainda podem ser utilizadas em aplicações práticas (PENNAFORT, et al, 2012). Na tabela 6 são apresentados os resultados médios das propriedades mecânicas obtidas em um ensaio de tração comparando o PVC virgem (PVCV) com o PVC reciclado (PVCR). As propriedades apresentadas são Tensão máxima (σ_{max}), Tensão de Escoamento (σ_{esc}), Tensão de Ruptura (σ_{rup}), Deformação na tensão de ruptura e módulo de elasticidade (E)

Tabela 6 - Propriedades mecânicas obtidas em um ensaio de tensão em amostras de PVC virgem e reciclado

Material		σ_{max} (Mpa)	σ_{esc} (Mpa)	σ_{rup} (Mpa)	Deformação na σ_{rup} (mm)	E (Mpa)
PVCV	Média	34,8	34,8	29,7	38,9	3061,2
	Desvio	2,5	2,5	3,1	25,8	280,8
PVCR	Média	29,9	29,9	25,6	35,5	2890,6
	Desvio	1,4	1,4	0,9	9,6	99,4

Fonte: PENNAFORT (2012)

Na tabela 7, encontram-se as principais propriedades mecânicas dos polímeros de maior relevância, nela, são listadas as principais propriedades observadas, o percentual máximo de material reciclado utilizado nas análises, e outras observações.

Tabela 7 - Principais propriedades observadas nos polímeros abordados, e percentual máximo de material reciclado utilizado sem impacto significativo nessas propriedades.

Material	Propriedades	Percentual máximo (%)	Observações
Polipropileno	Mecânicas em geral	< 30	-
PC/ABS (70/30)	Resistência ao impacto	< 2	-
PC/PBT	Alongamento na ruptura, resistência ao	100	Propriedades recuperadas após

	impacto, resistência ao amarelamento		reprocessamento
PVC	Mecânicas em geral	100	Mantém maior parte das propriedades

Fonte: Autoria própria (2023).

5 DISCUSSÃO

Comparando aspectos econômicos de componentes metálicos e polímeros, fica evidente que os metais são materiais de destaque, uma vez que possuem um valor em relação ao seu volume relativo maior que ao valor dos plásticos (com exceção ao Nylon, que possui um valor até superior que ao do ferro, porém representa pouco da massa relativa de veículos). No Brasil, que é um país cuja cultura de coleta informal de resíduos é muito expressiva, isso acaba sendo um fator de importância, uma vez que materiais com maior valor com relação ao seu volume possuem maiores índices de coleta.

Considerando o preço por kg das sucatas de polímeros versus o preço de suas resinas virgens, o ganho que a indústria automotiva poderia ter caso fosse possível reciclar esses materiais sem a perda de propriedades também pode ser expressivo, uma vez que as sucatas podem possuir um valor até 100 vezes menor que o valor das resinas virgens, podendo ser um indicativo do potencial econômico que a utilização de materiais reciclados poderia representar para as empresas envolvidas na rede produtiva de automóveis. No contexto deste trabalho, a comparação é feita entre os preços desses materiais encontrados em *marketplaces*, o que não representa a realidade da indústria, uma vez que os valores adotados nela variam de acordo com a variedade adquirida, divergindo dos valores de *marketplaces*. Além disso, também existe um custo no reprocessamento de polímeros, e a utilização de 100% de materiais reciclados na composição final de produtos é muito dificultada, uma vez que os requisitos mínimos de cada uma das propriedades do material devem ser respeitados numa indústria onde o fator de segurança é crucial, e para atingir esses requisitos, normalmente apenas parte da composição de produtos finais é de material reciclado.

Quanto ao potencial para a produção de óleos combustíveis, comparando os principais polímeros presentes em veículos com a produção de energia a partir de pneus, constata-se que, para o PP, o processo de pirólise resulta em óleos combustíveis com valores satisfatórios de rendimento, além do óleo gerado possuir um poder calorífico comparável ao da gasolina, o que representa um potencial para a utilização deste material na indústria de energia. Ademais, a pirólise de PP também gera subprodutos que podem ser utilizados na indústria química como matéria prima.

Para o PVC, o rendimento de conversão em óleo é baixo, e considerando que a composição do polímero contém cloro, é necessário procurar outras alternativas de reaproveitamento para o polímero.

No caso do ABS, o rendimento da conversão em óleo é similar ao do PP, porém sua composição conta com compostos nitrogenados, que podem gerar componentes tóxicos após a queima, sendo potencialmente perigosos. Na pirólise de PU, também se constata diversos componentes tóxicos.

Considerando as propriedades físicas, existe a viabilidade na utilização de PP reciclado especificamente em aplicações automotivas, em composições de até 30% de material reciclado na fabricação de para-choques. Para blendas de PC/ABS, a vantagem da reciclagem em aplicações de requisição mecânica é baixa, uma vez que a quantidade de material reciclado que pode ser utilizada também é baixa. Já em blendas de PC/PBT, o potencial de reciclabilidade é alto, já que peças recicladas apresentam uma recuperação de suas principais propriedades mecânicas.

O PVC, que normalmente é utilizado em componentes internos do automóvel, também mantém boa parte de suas propriedades mecânicas, indicando um bom potencial de reciclagem.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados compilados neste trabalho, nota-se que existe um grande potencial econômico na reciclagem dos polímeros e reinserção dos mesmos na cadeia da indústria automotiva. Considerando as propriedades mecânicas dos principais polímeros utilizados pela indústria, há uma viabilidade de reutilizá-los em sua aplicação original, principalmente para o PP, ABS e blendas de PC/ABS, ou até mesmo em aplicações onde as propriedades mecânicas são dispensáveis. Muitos dos trabalhos citados neste trabalho mencionam o exemplo do PET e do PVC, que podem ser reciclados e utilizados para a fabricação de tapetes, por exemplo.

Baseando-se em produtos que possuem alta taxa de reaproveitamento, como a utilização de pneus na produção de óleo combustível, apenas o PP apresenta um potencial significativo, enquanto essa opção não é viável para o PVC, PU e ABS.

Um dos principais dificultadores na implementação do reaproveitamento desses materiais é a baixa rentabilidade do processo de coleta dos polímeros. Para superar esta questão, pode ser necessário que o Brasil se baseie em modelos de outros países, através de sistemas de incentivo governamental, fortalecimento da legislação, fiscalização e até mesmo intervenção direta do governo. Estudos aprofundando a esfera político-econômica da implementação de um sistema de logística reversa e reaproveitamento de polímeros provenientes de automóveis no Brasil ainda são necessários.

O aumento do índice de reciclagem de veículos no Brasil é um tema urgente, uma vez que esse índice atualmente é de apenas 1,5%, porém o aumento deste índice não solucionaria todos os problemas adjacentes à indústria automobilística. Para maior aprofundamento no aumento da taxa de reciclabilidade de veículos e para tratar de demais problemas ambientais da indústria, indicam-se os seguintes estudos:

Potencial de ganhos econômicos de cada um dos elos da indústria com o fortalecimento da logística reversa (indústria petroquímica, indústria plástica, OEM's, montadoras, empresas de coleta, empresas de reciclagem).

Viabilidade da separação de componentes tóxicos presentes em óleo de pirólise produzido a partir de PVC, PU, ABS e demais plásticos para eventual utilização como óleo combustível.

Utilização de subprodutos da pirólise de plásticos para a produção de novos

polímeros de aplicação automobilísticos.

Viabilidade do processo de captura de gases provenientes da queima de combustíveis tradicionais e de óleos combustíveis, e utilização desses gases como matéria prima para a produção de novos polímeros, como forma de sequestro de carbono.

REFERÊNCIAS

ALIBABA. **Sucatas e resinas virgens de polímeros**. Disponível em: <<https://www.alibaba.com/>>. Acesso em 05 ago. 2023.

ALVARO, Julie. **Tudo sobre densidade do plástico**. Disponível em: <[https://www.plastico.com.br/tudo-sobre-densidade-do-plastico/#:~:text=PVC%20\(Policloreto%20de%20vinila\)%3A%201%2C40%20g%2Fcm%2%B3](https://www.plastico.com.br/tudo-sobre-densidade-do-plastico/#:~:text=PVC%20(Policloreto%20de%20vinila)%3A%201%2C40%20g%2Fcm%2%B3)>. Acesso em: 05 ago. 2023.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS. **Resultados do Setor de Pneus 2022**. São Paulo, 2023. Disponível em: <<https://www.anip.org.br/anip-em-numeros/publicacoes/>>. Acesso em: 09 jul. 2023.

AZEVEDO, J.L.; A Economia Circular Aplicada no Brasil: Uma Análise a Partir dos Instrumentos Legais Existentes para a Logística Reversa. In: CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO, 11., 2015, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: CNEG, 2015. p. 1-16.

BRÁS, D. M. **Estudo da Pirólise de Resíduos Plásticos provenientes do Abate de Automóveis**. 2011. 144 f. Dissertação (Mestre em Energia e Bioenergia) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.

BRASIL. Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a política nacional de resíduos sólidos; altera a lei N° 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 2 ago. 2010.

BRASKEM. **Propriedades de referência dos compostos de PVC**. 2002. Boletim técnico. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/Portal/Principal/Arquivos/html/boletm_tecnico/Tabela_d_e_Propriedades_de_Referencia_dos_Compostos_de_PVC.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2023.

CÂNDIDO, L. H. A. **Estudo do ciclo de reciclagem de materiais em blendas acrilonitrila-butadieno-estireno/policarbonato**. 2011. 129 f. Tese (Doutor em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

CILO, Nelson. **Brasil recicla apenas 1,5% das carcaças de carros velhos e abandonados**. Disponível em: <https://www.correioabraziliense.com.br/app/noticia/economia/2019/04/09/internas_economia,748292/brasil-recicla-apenas-1-5-das-carcacas-de-carros-velhos-e-abandonados.shtml>. Acesso em: 08 de jul. de 2023.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo. **Emissões Veiculares no**

estado de São Paulo 2021. São Paulo, 2022. Série relatórios. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>>. Acesso em: 08 jul. 2023.

COMPER, Indiana Caliman, SOUZA, Felipe Oliveira, CHAVES, Gisele de Lorena Diniz. Caracterização e Desafios da Logística Reversa de Óleos Lubrificantes. **Revista em Gestão, Inovação e Sustentabilidade**, Brasília, v. 2, n. 1, p. 131-155, jun. 2016.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. CNI. **Perfil Setorial da Indústria Brasileira: Veículos Automotores - Produção.** Disponível em: <<https://perfilsetorialdaindustria.portaldaindustria.com.br/listar/29-veiculos-automotores/producao>>. Acesso em: 08 jul. 2023.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. CNI. **Perfil Setorial da Indústria Brasileira: Veículos Automotores – Mercado de Trabalho.** Disponível em: <<https://perfilsetorialdaindustria.portaldaindustria.com.br/listar/29-veiculos-automotores/mercado-de-trabalho>>. Acesso em: 08 de jul. 2023.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Ministério do Meio Ambiente. **Coleta de óleo lubrificante usado ou contaminado, ano 2022.** Brasília, 2022.
CROTTI, B. F. **Estudo da pirólise de polipropileno para produção de óleo.** 2018. 64 f. TCC (Bacharel em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2018.

COUTINHO, F.M.B., MELLO, I.L., SANTA MARIA, L.C. **Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações.** 2002. Dissertação – Instituto de Química, UERJ, Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0104-14282003000100005>>. Acesso em: 30 ago. 2023.

DEPÓSITO MARMELEIRO. **Tabela de preços.** Disponível em: <<https://www.depositomarmeleiro.com.br/tabelas-preco/>>. Acesso em: 05 ago. 2023.

ELLIOTT, A.N.A. **Automotive Applications of Polymers II.** v. 50, n. 2. Shropshire, UK: iSmithers Rapra Publishing, 1991. 94 p.

FEDERAÇÃO NACIONAL DO COMÉRCIO DE COMBUSTÍVEIS E DE LUBRIFICANTES. **Relatório Anual de Revenda de Combustíveis 2017.** Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <<https://www.fecombustiveis.org.br/relatorios-anuais>>. Acesso em: 09 jul. 2023.

FERREIRA, A. B. **Análise de processos de pirólise para a reciclagem de polietileno e polipropileno.** 2021. 56 f. TCC (Bacharel em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

FILAMENTOS 3D. **Ficha técnica:** filamento ABS premium. Disponível em:

<<https://www.filamentos3dbrasil.com.br/fichatecnica/#:~:text=Como%20a%20densidade%20de%20ABS,ir%C3%A1%20pesar%20%2C50%20gramas>>. Acesso em: 05 ago. 2023.

FONTES, Stella. **CSN vai elevar preços do aço em 10% a partir de 1° de janeiro.** Disponível em: <<https://valor.globo.com/empresas/noticia/2022/12/15/csn-vai-elevar-precos-do-aco-em-10percent-a-partir-de-1o-de-janeiro.ghtml>>. Acesso em: 05 ago. 2023.

FUNDIÇÃO MARTINELLI. **Especificação Técnica do Nylon Poliamida PA 6.** Disponível em: <<https://fundicaomartinelli.com.br/especificacao-tecnica-do-nylon-poliamida-pa6/>>. Acesso em: 05 ago. 2023.

GOMES, D.E.B. Estudo sobre a reciclagem na indústria automotiva e sua inserção em um ambiente virtual de ensino. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 9., 2001. Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001.

HEMAIS, C. A. **Polímeros e a indústria automobilística.** 2002. Dissertação – Grupo de Gestão Tecnológica, IMA, UFRJ, Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0104-14282003000200008>>. Acesso em: 15 jul. 2023.

INCOMPLAST. **Polipropileno (PP).** Disponível em: <<https://incomplast.com.br/polipropileno/>>. Acesso em: 30 ago. 2023.

INTERNATIONAL ORGANIZATION OF MOTOR VEHICLE MANUFACTURERS. OICA. **2022 Production Statistics.** Disponível em: <<https://www.oica.net/category/production-statistics/2022-statistics/>>. Acesso em: 08 jul. 2023.

JUNIOR, H. A. **Pirólise de misturas plásticas.** 2017. 142 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

KRUMWIEDE, D.W., SHEU, C. A model for reverse logistics entry by third-party providers. **Omega**, v. 30, n. 5. p. 325-333, out. 2002.

LEITE, Paulo Roberto; **Logística Reversa: Sustentabilidade e competitividade.** 3. Ed. São Paulo: Saraiva Educação S.A., 2017. 360 p.

LEITE, Paulo Roberto; ZAMITH, Eliane Pereira. Logística Reversa de Produtos Não Consumidos: Práticas de Empresas no Brasil. **Revista Eletrônica de Gestão Organizacional**, Recife, PE, V. 3, n. 3, set./dez. 2005, p. 215-229. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/gestaoorg/article/view/21579/18273>. Acesso em: 03 jul. 2023.

LINDAU, L.A., et al. Benefícios de um programa de renovação acelerada da frota de automóveis no Brasil. In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA EM TRANSPORTE DA ANPET, 19., 2015. Ouro Preto. Anais... Ouro Preto: ANPET, 2015. p. 2620-2631.

LITORAL LIMPO – COMÉRCIO DE SUCATAS EM GERAL. **Preços:** Sucata ferrosa e não-ferrosa. Disponível em: <<https://litorallimpo.com.br/precos/>>. Acesso em: 05 ago. 2023.

MAEDA, W.I.M. **Remanufatura para o mercado automotivo e suas estratégias para o pós vendas de autopeças.** 2021. 39 f. TCC (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2021.

MALAGUETA, D.C. **O desafio da reciclagem de plásticos automotivos.** 2003. 10f. Iniciação Científica (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

MEDINA, Heloísa Vasconcelos de., GOMES, Dennys Enry Barreto. **Reciclagem de Automóveis:** Estratégias, práticas e perspectivas. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2003. 60 p.

MOTTA, F.G. A cadeia de destinação dos pneus inservíveis: o papel da regulação e do desenvolvimento tecnológico. **Ambiente & Sociedade**, Campinas, SP, v.11, n. 1, jan./jun. 2008, p. 167-184. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/asoc/a/LTPx7wtmmwSNTq4nNvChyNH/#>>. Acesso em: 05 ago. 2023.

O SUCATEIRO. **Sucata de Pneu.** Disponível em: <<https://osucateiro.com/>>. Acesso em: 05 ago. 2023.

ODA, Sandra, JÚNIOR, José Leomar Fernandes. Borracha de pneus como modificador de cimentos asfálticos para uso em obras de pavimentação. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 23, n. 6, p. 1589-1599, 2001.

PATIL, A., PATEL, A., PUROHIT, R. An overview of Polymeric Materials for Automotive Applications. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF MATERIALS PROCESSING AND CHARACTERIZATION, 5., 2016, Rourkela. *Materials Today: Proceedings* 4, 2017. P 3807-3815.

PENNAFORT JR, L. C. G. et al, Avaliação e Caracterização de Tubos Fabricados com PVC Reciclado. **Polímeros**, v. 23, n. 4, p. 547-551, 2013.

RIBEIRO, M.P. **Aspectos relacionados à logística reversa e à política nacional dos resíduos sólidos:** um estudo de caso sobre a reciclagem automotiva no Brasil. 2018. 24 f. TCC (Graduação em Administração) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.

ROGERS, Dale S.; TIBBEN-LEMBKE, Ronald S; **Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices**. Reno: University of Nevada, 1998. 275 p.

SALAZAR, V. L. P., CARASCHI, J. C., LEÃO, A. L. Análise comparativa dos compostos de pirólise de assentos automobilísticos a base de manta de fibra de coco com látex e de espuma de poliuretano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 14., 2000, São Pedro, SP. Anais... Botucatu: UNESP, 2000, p. 21101-21112.

SANCHEZ, E. M. S. Potencial de reciclagem da blenda PC/PBT. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 7., 2003, Belo Horizonte. Anais... Campinas: PUC, 2003, p. 792-793.

SANT ANNA, Jose Paulo. **Plásticos nos automóveis** - Aplicações automotivas crescem. Disponível em: <<https://www.plastico.com.br/plasticos-nos-automoveis-aplicacoes-automotivas-crescem/#:~:text=Ele%20calcula%2C%20em%20m%C3%A9dia%2C%20que,se%20manter%20nos%20pr%C3%B3ximos%20anos>>. Acesso em: 08 jul. 2023.

SAUDI BASIC INDUSTRIES CORPORATION. **Sabic launches recycled automotive grades under Trucircle™ portfolio of circular solutions**. Disponível em: <<https://www.sabic.com/en/news/30445-sabic-launches-recycled-automotive-grades-under-trucircle-portfolio-of-circular-solutions>>. Acesso em: 09 jul. 2023.

SCHULTMANN, F., ZUMKELLER, M., RENTZ, O. Modeling reverse logistic tasks within closed-loop supply chains: An example from the automotive industry. **European Journal of Operational Research**, v. 171, n. 3. p. 1033-1050, jun. 2016.

SCHWALM, P.C., RANGEL, N. L. S. V., MACIEL, G. P. S. Pirólise de pneus inservíveis para fins energéticos: uma revisão dos produtos de pirólise e suas aplicações. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, RS, v. 21, n. 36, jul./dez. 2020, p. 101-204.

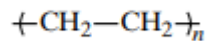
SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE COMPONENTES PARA VEÍCULOS AUTOMOTORES. Associação Brasileira da Indústria de Autopeças. **Relatório da Frota Circulante Edição de 2023**. São Paulo, 2022. Disponível em: <<https://www.sindipecas.org.br/area-atuacao/?co=s&a=frota-circulante>>. Acesso em: 18 jul. 2023.

SIQUEIRA, G.S. A indústria automobilística e o meio ambiente: uma visão sustentável. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DE SERGIPE, 7., 2015. São Cristóvão. Anais... São Cristóvão: SIMPROD, 2015. p. 742-751.

SOARES, E.A. **Poli(cloreto de vinila) PVC**. Disponível em: <[https://www.arandanet.com.br/revista/pi/noticia/358-Poli\(cloreto-de-vinila\)-](https://www.arandanet.com.br/revista/pi/noticia/358-Poli(cloreto-de-vinila)-)

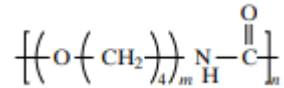
ANEXO A – Estrutura e propriedades dos principais polímeros abordados

Figura 3 - Monômero de Polietileno



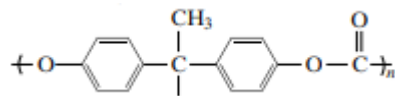
Fonte: SPERLING (2006).

Figura 4 - Monômero de Poliuretano



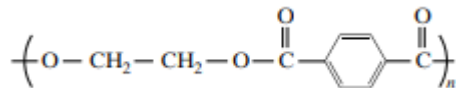
Fonte: SPERLING (2006).

Figura 5 - Monômero de Policarbonato



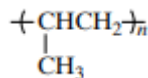
Fonte: SPERLING (2006).

Figura 6 - Monômero de PET



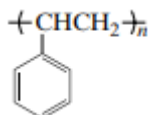
Fonte: SPERLING (2006).

Figura 7 - Monômero de Polipropileno



Fonte: SPERLING (2006).

Figura 8 - Monômero de Poliestireno



Fonte: SPERLING (2006).

Tabela 8 – Principais propriedades físicas e mecânicas do Polipropileno

Propriedade	Valor
Densidade	0,90 g/cm ³
Temperatura de transição vítrea (Tg)	-10°C
Temperatura de fusão (Tm)	170° C
Temperatura de uso contínuo	< 126° C
Temperatura de processamento	210 a 270° C
Módulo de elasticidade à tração	1100 Mpa

Tensão de escoamento à tração

35 Mpa

Alongamento até a ruptura

600%

Fonte: Adaptado de SOARES (2021) e INCOMPLAST (2023).

Figura 9 - Propriedades térmicas, físicas, elétricas e mecânicas do PEAD

Propriedades	Altamente linear	Baixo grau de ramificação
Densidade, g/cm ³	0,962 - 0,968	0,950 - 0,960
Índice de refração	1,54	1,53
Temperatura de fusão, °C	128 - 135	125 - 132
Temperatura de fragilidade, °C	-140 - -70	-140 - -70
Condutividade térmica, W/(m.K)	0,46 - 0,52	0,42 - 0,44
Calor de combustão, kJ/g	46,0	46,0
Constante dielétrica à 1 MHz	2,3 - 2,4	2,2 - 2,4
Resistividade superficial, Ω	10 ¹⁵	10 ¹⁵
Resistividade volumétrica, Ω.m	1017 - 1018	1017 - 1018
Resistência dielétrica, kV/mm	45 - 55	45 - 55
Ponto de escoamento, MPa	28 - 40	25 - 35
Módulo de tração, MPa	900 - 1200	800 - 900
Resistência à tração, MPa	25 - 45	20 - 40
Alongamento, %		
No ponto de escoamento	5 - 8	10 - 12
No ponto de ruptura	50 - 900	50 - 1200
Dureza		
Brinell, MPa	60 - 70	50 - 60
Rockwell	R55, D60 - D70	
Resistência ao cisalhamento, MPa	20 - 38	20 - 36

Fonte: COUTINHO et al. (2002)

Tabela 9 – Principais propriedades físicas e mecânicas do PVC rígido.

Propriedade	Valor
Densidade	1,40 g/cm ³
Temperatura de transição vítrea (Tg)	-45 a -10°C
Temperatura de escoamento	190 a 220° C
Temperatura de processamento	170 a 230° C
Temperatura de uso contínuo	< 110° C

Módulo de elasticidade à tração	3000 Mpa
Tensão de escoamento à tração	46 Mpa
Alongamento até a ruptura	2 - 40%
Resistência ao impacto	25-1500 J/m

Fonte: Adaptado de SOARES (2022) e BRASKEM (2002).

Tabela 10 – Propriedades físicas do PU.

Propriedade	Valor
Densidade	1,20 a 1,30 g/cm ³
Temperatura de transição vítrea (Tg) (70/30)	80°C
Temperatura de escoamento	260° C
Temperatura de processamento	160 a 220° C

Fonte: Adaptado de SOARES (2021).