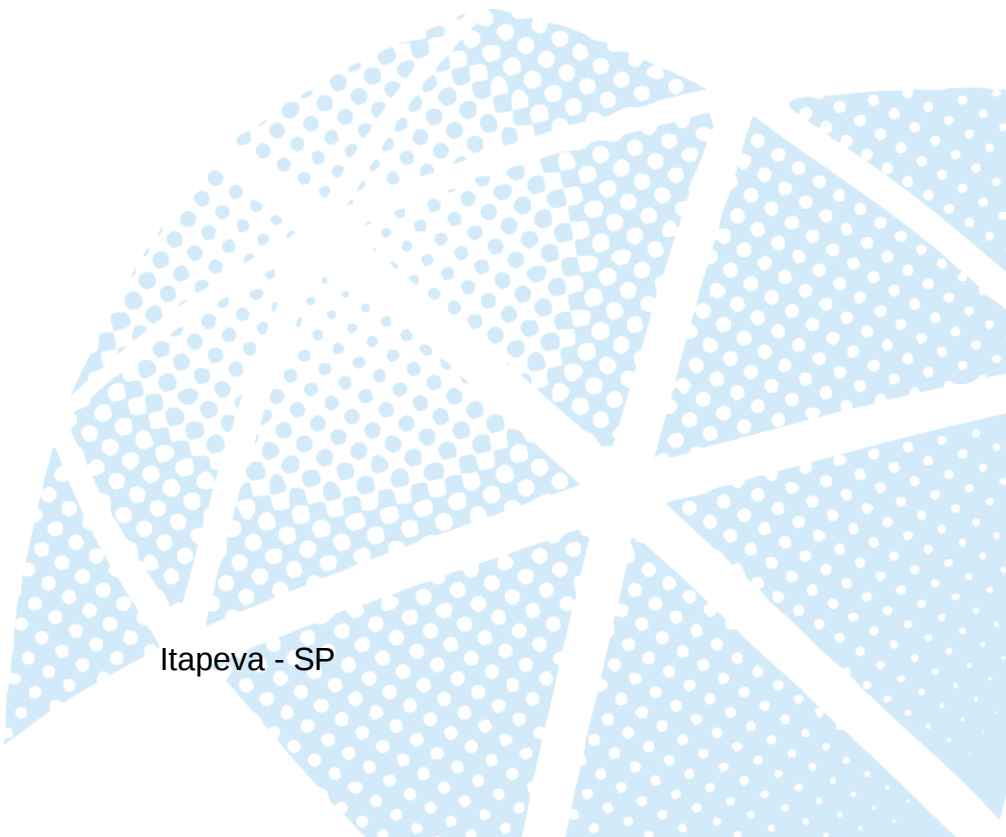


UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
Instituto de Ciências e Engenharia - Câmpus de Itapeva

LUIZ EDUARDO DE MORAES FERNANDES

**REAPROVEITAMENTO DE PNEUS E ISOPOR EM ITAPEVA-SP: UMA ANÁLISE
DA GESTÃO LOCAL E DE TÉCNICAS SOB PERSPECTIVA DA ECONOMIA
CIRCULAR**



Itapeva - SP

LUIZ EDUARDO DE MORAES FERNANDES

**REAPROVEITAMENTO DE PNEUS E ISOPOR EM ITAPEVA-SP: UMA ANÁLISE
DA GESTÃO LOCAL E DE TÉCNICAS SOB PERSPECTIVA DA ECONOMIA
CIRCULAR**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentada à Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Instituto de Ciências e
Engenharia, Câmpus de Itapeva, para
obtenção do título de Grau acadêmico
bacharelado em Engenharia de Produção.

Orientador(a): Prof. Dr. Irene Rodrigues
Freitas

Coorientador(a): Prof. Me. Marcos Daniel
Gomes de Castro

Itapeva - SP

2026

F363r

Fernandes, Luiz Eduardo de Moraes

Reaproveitamento de pneus e isopor em Itapeva-SP : Uma análise da gestão local e de técnicas sob perspectiva da economia circular / Luiz Eduardo de Moraes Fernandes. -- Itapeva, 2026

68 p. : tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Produção) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciências e Engenharia, Itapeva

Orientadora: Irene Rodrigues Freitas

Coorientador: Marcos Daniel Gomes de Castro

1. Economia circular. 2. Logística reversa. 3. Pneu. 4. Isopor. 5.

Resíduos sólidos. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).



LUIZ EDUARDO DE MORAES FERNANDES

REAPROVEITAMENTO DE PNEUS E ISOPOR EM ITAPEVA-SP:

Uma análise da gestão local e de técnicas sob perspectiva da economia circular

Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção, da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof.^a Dr.^a Irene Rodrigues Freitas
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

2º Examinador: Prof.^a Dr.^a Gretta Larisa Aurora Arce Ferrufino
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

3º Examinador: Prof. Dr. Bruno Santos Ferreira
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

Itapeva, 19/06/2026.

Dedico este trabalho à minha família,
amigos, e todos que me apoiaram durante
minha trajetória!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à toda minha família, especialmente a minha mãe, meu pai e meu irmão que durante toda a minha graduação estiveram presentes, me apoiaram e sempre incentivaram meus estudos independentemente de tudo. Nada seria possível sem esse apoio.

Agradeço também à minha professora e orientadora Irene, assim como o professor Marcos pela paciência, dedicação e pelos conhecimentos compartilhados, que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

A República Operação, e especialmente ao meu amigo Peterson, que me ajudou muito ao longo desta jornada.

Por fim, à tradicional República Motosserra, local onde morei durante toda a graduação e onde vivi alguns dos melhores momentos da minha vida ao lado de grandes amigos.

Sem a colaboração de todos, eu não estaria onde estou hoje. Obrigado a todos!

"Mesmo que nossos corpos pereçam, suas vontades nunca serão apagadas! E assim, através das gerações, os homens continuarão a herdar e carregar seus desejos!" - Eiichiro Oda

RESUMO

A economia circular aplicada à gestão de resíduos sólidos urbanos constitui uma alternativa estratégica para a redução de passivos ambientais gerados por materiais de difícil reaproveitamento, como pneus inservíveis e poliestireno expandido (EPS). Foi realizado uma análise de natureza exploratória e descritiva, com abordagem qualitativa, que teve como objetivo analisar a gestão atual, de forma econômica e ambiental quanto reaproveitamento desses resíduos no município de Itapeva-SP por meio da comparação das principais técnicas de reaproveitamento identificadas na literatura científica, considerando sua complexidade, os requisitos de infraestrutura e sua aplicabilidade ao contexto do município. A metodologia envolveu revisão bibliográfica, visita técnica ao depósito municipal de pneus, entrevista semiestruturada com a responsável pelo setor e visita à cooperativa Coopersel, responsável pela gestão do EPS no município. Os levantamentos realizados identificaram aproximadamente 1.800 pneus armazenados no ecoponto municipal, além da ausência de cobertura e de organização adequada para estocagem. No caso do EPS, verificou-se a dependência de um único operador para sua destinação, associada ao baixo valor de mercado do material. A revisão da literatura permitiu avaliar as tecnologias de coprocessamento, granulação e laminação para os pneus, e de reciclagem mecânica, química, energética e incorporação em concreto leve para o EPS. O coprocessamento representa a alternativa mais promissora para a destinação dos pneus inservíveis, enquanto a incorporação do EPS em concreto leve apresentou maior potencial de aplicação em Itapeva-SP. Entretanto, sua implementação depende da ampliação da infraestrutura, de parcerias estratégicas e do fortalecimento da logística reversa e da educação ambiental.

Palavras-chave: Economia Circular; logística reversa; pneus inservíveis; poliestireno expandido; resíduos sólidos.

ABSTRACT

Circular economy applied to the management of municipal solid waste represents a strategic alternative for reducing the environmental impacts caused by materials that are difficult to recycle, such as end-of-life tires and expanded polystyrene (EPS). This study consists of an exploratory and descriptive case study with a qualitative approach aimed at analyzing the technical, economic, and environmental feasibility of reusing these materials in the municipality of Itapeva, São Paulo, Brazil. The methodology included a literature review, a technical visit to the municipal tire storage site, a semi-structured interview with the person responsible for the sector, and a visit to the Coopersel cooperative, which manages EPS waste in the municipality. The survey identified approximately 1,800 tires stored at the municipal collection site, as well as inadequate storage conditions due to the lack of coverage and organization. Regarding EPS, the study found dependence on a single operator for its destination, associated with the material's low market value. The literature review enabled the evaluation of coprocessing, granulation, and lamination technologies for tires, as well as mechanical, chemical, and energy recycling and incorporation into lightweight concrete for EPS. The results indicate that coprocessing is the most promising alternative for end-of-life tires, while the incorporation of EPS into lightweight concrete showed the greatest potential for application in Itapeva. However, its implementation depends on improvements in local infrastructure, strategic partnerships, strengthened reverse logistics, and environmental education initiatives.

Keywords: Circular Economy; Reverse Logistics; End-of-Life Tires; Expanded Polystyrene; Solid Waste; Waste Management.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma da Metodologia	30
Figura 2 – Armazenamento de pneus do depósito municipal de Itapeva	31
Figura 3 – Armazenamento de pneus do depósito municipal de Itapeva	32
Figura 4 – Estoque do EPS	41
Figura 5 – Prensagem do EPS	42
Figura 6 – Isopor prensado e separado para comercialização	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Poder Calorífico Inferior (PCI) de diferentes combustíveis.	25
Tabela 2 - Componentes da estrutura do pneu	34
Tabela 3 – Componentes químicos e físicos do Isopor	35
Tabela 4 – Ciclo do Pneu	38
Tabela 5 – Ciclo do EPS	45
Tabela 6 – Tecnologia de destinação final e quantidade total de pneus inservíveis destinados	56
Tabela 7 - Esquematização sobre o reaproveitamento do pneu	50
Tabela 8 – Esquematização sobre o reaproveitamento do EPS	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIPLAST	Associação Brasileira da Indústria do Plástico
ABRERPI	Associação Brasileira de Empresas de Reciclagem de Pneus Inservíveis
ACT	Administração Científica do Trabalho
AIT	Associação Internacional do Trabalho
ANIP	Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos
EPS	Poliestireno Expandido
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IES	Instituição de Ensino Superior
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
MEC	Ministério da Educação
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MMA	Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos
OMS	Organização Mundial da Saúde

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 Gestão de Resíduos Sólidos e a Política Nacional (PNRS)	19
3.2 Caracterização e Impactos dos Resíduos em Estudo	20
3.2.1 Pneus Inservíveis	20
3.2.2 Poliestireno Expandido (EPS)	23
3.3 Tecnologias de Valorização de Resíduos	24
3.3.1 Valorização mecânica	24
3.3.2 Valorização energética (Coprocessamento e pirólise)	25
3.3.3 Reciclagem do EPS e Limitações Técnicas	26
3.4 Viabilidade Técnica e Econômica	27
3.5 Logística Reversa e Economia Circular na Gestão de Resíduos Sólidos	29
3.5.1 Logística Reversa de pós-consumo	30
3.5.2 Economia Circular	30
4 METODOLOGIA	31
4.1 Estudo de caso	32
4.1.1 Análise de componentes dos pneus	32
4.2 Análise de componentes do isopor	33
4.3 Gestão dos Resíduos em Itapeva	34
4.4 Alternativas de Economia Circular para Pneus Inservíveis	37
4.4.1 Reciclagem Energética (Coprocessamento de Pneus)	37
4.4.2 Reciclagem Mecânica de Pneus (Granulação)	39
4.4.3 Laminação	40
4.5 Gestão de Resíduos em Itapeva (EPS)	44
4.5.1 Alternativas de Economia Circular para Isopor	45
4.5.2 Reciclagem Mecânica	45
4.5.3 Reciclagem química	47
4.5.4 Reciclagem energética	48
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5.1 Pneus	49
5.2 Isopor	51
5.5 Custos associados às formas de reaproveitamento dos materiais	53
5.5.1 Considerações Metodológicas sobre a Análise de Custos	53
5.5.2 Custos Associados aos Pneus	53
5.5.3 Custos associados ao EPS	56
6 Considerações finais	57
7 REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

A gestão de resíduos sólidos caracteriza-se como um dos mais complexos desafios ambientais enfrentados pelos municípios brasileiros na atualidade. A intensificação do consumo, aliada ao dinamismo das atividades econômicas e ao crescimento demográfico, tem provocado aumento expressivo na geração de resíduos pós-consumo, exigindo dos entes municipais maior capacidade de planejamento e resposta técnica.

A economia circular surge como uma alternativa a esse modelo tradicional de descarte, propondo que os materiais sejam mantidos em uso pelo maior tempo possível, por meio do reparo, da reutilização ou da reciclagem. Para os municípios, essa mudança de lógica pode representar redução no volume de resíduos a serem gerenciados, menor pressão sobre os aterros sanitários e uma gestão mais eficiente dos recursos públicos.

No município de Itapeva, entre os resíduos que demandam maior atenção destacam-se principalmente pneus e o poliestireno expandido (EPS), resíduos que apresentam grande dificuldade de destinação final adequada, resultando em um acúmulo excessivo que pode gerar problemas ambientais graves.

Os pneus inservíveis, cujo volume de comercialização em âmbito nacional evidencia a dimensão do problema. De acordo com o Relatório de Pneumáticos publicado pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama, 2025), apenas em 2024 foram introduzidos no mercado brasileiro de reposição cerca de 91 milhões de pneus novos, correspondendo a mais de 1,180 milhão de toneladas. Esses números reforçam a tendência de crescimento contínuo da cadeia produtiva e, conseqüentemente, do passivo ambiental associado ao descarte.

A elevada durabilidade dos pneus, somada à sua composição química complexa e à baixa degradabilidade em condições naturais, torna o descarte inadequado um fator de risco ambiental significativo. Entre os impactos potenciais, destacam-se a contaminação do solo e dos recursos hídricos, bem como a formação de ambientes favoráveis à proliferação de vetores de doenças, especialmente o *Aedes aegypti*, transmissor de enfermidades como dengue, zika e chikungunya (Ministério da Saúde, 2022). Nesse contexto, a implementação de mecanismos

eficientes de logística reversa e reaproveitamento torna-se não apenas recomendável, mas imprescindível.

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) estabelece diretrizes para a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, determinando que fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores e o poder público atuem conjuntamente na destinação ambientalmente adequada dos resíduos. Visto isso, a logística reversa assume papel estratégico na reinserção de materiais ao ciclo produtivo. (Brasil, 2010).

Em Itapeva, observa-se a existência de sistema de armazenamento temporário para pneus inservíveis, cuja destinação final depende da retirada periódica por empresas especializadas. Entretanto, limitações estruturais, irregularidades na coleta e restrições operacionais impostas por empresas contratadas revelam fragilidades na cadeia reversa local. Tais fatores resultam em acúmulo temporário e ampliam a dependência de agentes externos para a adequada destinação do resíduo.

Além dos pneus, o poliestireno expandido (EPS), amplamente conhecido como isopor, também constitui um resíduo de baixa atratividade econômica e limitada viabilidade comercial. Embora tecnicamente reciclável, sua reduzida densidade e o elevado custo logístico associado ao transporte dificultam sua inserção em cadeias produtivas consolidadas, gerando entraves operacionais e financeiros para a gestão municipal. Como consequência, esse material apresenta elevada persistência no ambiente, com maior propensão à disposição inadequada em aterros e consequente intensificação dos impactos ambientais associados ao acúmulo de resíduos plásticos.

A pesquisa foca na realidade local, onde esses resíduos representam um problema logístico sério, e realiza uma comparação entre os processos de tratamento disponíveis para entender quais se adaptam melhor ao município.

Ao mapear a logística utilizada na região, o estudo identifica gargalos operacionais importantes, como a dificuldade no transporte do isopor devido ao seu volume, e as restrições na destinação final de pneus inservíveis, que muitas vezes permanecem acumulados no depósito municipal por falta de alternativas viáveis de destinação. Assim, o trabalho tem como foco analisar a viabilidade de estruturar práticas de economia circular para pneus inservíveis e EPS no município de Itapeva, buscando identificar os principais obstáculos dessa cadeia e propor caminhos que

contribuam para uma gestão mais eficiente desses resíduos e para o fortalecimento da economia circular dentro do município.

2 OBJETIVO

Analisar as práticas de economia circular para a destinação correta e o processamento de resíduos de isopor e pneus no município de Itapeva-SP, considerando, de forma qualitativa, os aspectos relacionados aos custos de implementação e ao potencial de geração de valor agregado.

2.1 Objetivos específicos

- Analisar os componentes de cada resíduo do estudo;
- Identificar oportunidades de geração de valor agregado a partir do reaproveitamento desses materiais;
- Verificar os métodos existentes de processamento e reaproveitamento aplicáveis aos pneus e isopor;
- Propor alternativas sustentáveis que integrem economia circular e possam ser aplicadas em Itapeva;
- Avaliar os custos associados às diferentes formas de destinação e reciclagem.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Gestão de Resíduos Sólidos e a Política Nacional (PNRS)

Historicamente, a gestão de resíduos sólidos no Brasil foi marcada por diversas limitações estruturais. Até meados do século XX, predominavam práticas inadequadas de destinação, como a disposição em lixões e a queima a céu aberto, que resultaram em impactos negativos ao solo, aos recursos hídricos, à qualidade do ar e à saúde pública. Nesse período, o gerenciamento dos resíduos caracterizava-se por uma abordagem fragmentada e com baixo nível de regulamentação, refletindo a limitada conscientização ambiental e a ausência de planejamento institucional. Além disso, a responsabilidade pela coleta e destinação dos resíduos concentrava-se majoritariamente no poder público municipal, sem a participação efetiva do setor privado e da população (Da Silva et al., 2026)

A Lei nº 12.305/2010, que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), destaca-se como um marco relevante no âmbito das políticas públicas ambientais, sendo reconhecida pela sua consistência e alinhamento com abordagens contemporâneas, como os princípios da economia circular, que incluem a prevenção da geração de resíduos, a valorização de materiais e a implementação de sistemas de logística reversa (Cosenza et al., 2020).

São estabelecidas diretrizes para a gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos, atribuindo responsabilidades ao poder público e aos geradores (Brasil, 2010). A política se fundamenta em princípios como a ordem de prioridade (não geração, redução, reutilização e reciclagem) e a implementação de sistemas de logística reversa. Destaca-se, ainda, o princípio da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, que envolve fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores e os serviços públicos de limpeza urbana. Ademais, define uma hierarquia de gestão dos resíduos, estabelecendo que apenas rejeitos devem ser destinados a aterros sanitários e incentivando a inclusão de cooperativas de catadores no processo.

Apesar dos avanços observados na gestão de resíduos sólidos urbanos na última década, a implementação da referida lei ainda não ocorre de forma plena, o que compromete sua efetividade. Esse cenário está associado, principalmente, ao desconhecimento das especificidades locais relacionadas à temática, à insuficiência

de instrumentos adequados e à ausência de planejamento estratégico (Barros; Silveira, 2019; Camolezi *et al.*, 2021; Martins *et al.*, 2022)

Sob essa perspectiva, observa-se, no âmbito das políticas públicas brasileiras, um distanciamento entre os órgãos responsáveis pela formulação de diretrizes em nível nacional e aqueles encarregados de sua execução. Essa separação, associada a limitações na articulação entre diferentes instâncias governamentais, resulta em dificuldades de integração das políticas públicas, tanto no plano vertical, entre os diferentes níveis de governo, quanto no plano horizontal, entre setores que demandam atuação conjunta, como saneamento e meio ambiente (Maiello; Britto; Valle, 2018).

Diante das limitações observadas na implementação efetiva da PNRS, destaca-se a necessidade de adoção de abordagens complementares que promovam maior eficiência na gestão de resíduos. Para isso, o monitoramento da geração de resíduos constitui um elemento fundamental para o planejamento de estratégias, uma vez que a disponibilidade de dados e indicadores confiáveis, aliada à sua adequada interpretação, influencia diretamente os processos de tomada de decisão e permite que governos e operadores projetem e executem ações de forma mais eficiente e economicamente viável (Camolezi *et al.*, 2021; Kaza *et al.* 2018)

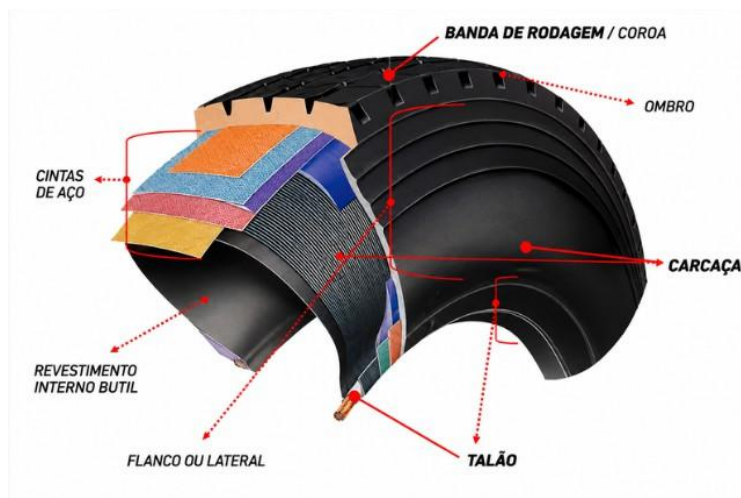
3.2 Caracterização e Impactos dos Resíduos em Estudo

3.2.1 Pneus Inservíveis

De acordo com a ABNT NBR 10004, a classificação dos pneus inservíveis depende de sua caracterização físico-química. Em razão de sua composição e propriedades, esses resíduos são geralmente considerados não inertes e possuem destinação regulamentada pela Resolução CONAMA nº 416/2009.

O pneu consiste em um produto industrial composto por uma estrutura complexa, formada por diferentes componentes, como banda de rodagem, cintas de aço, talão, carcaça de lona e parede lateral (flanco), que, em conjunto, determinam seu desempenho e funcionalidade (Lacerda, 2003, Lima, 2022). De acordo com sua configuração estrutural, podem ser classificados em dois tipos principais: radiais e convencionais (diagonais). A maior parte dos pneus utilizados em automóveis e caminhões é do tipo radial, em razão de seu desenho e do reforço na banda de

rodagem, que proporcionam maior resistência, durabilidade, aderência e estabilidade.



Fonte - Continental Pneus - 2024

Trata-se de um bem de consumo amplamente utilizado em escala global, cuja utilização adequada exige características como bom desempenho, elevada resistência e confiabilidade, de modo a garantir conforto e segurança (Lima, 2022). Contudo, ao final de sua vida útil, o pneu deixa de cumprir essas funções e passa a configurar um resíduo, sendo frequentemente descartado junto a outros materiais, o que pode acarretar significativos impactos ambientais e econômicos (Ramos, 2005; Lima, 2022).

A principal dificuldade associada à reciclagem desse material está relacionada ao processo de vulcanização, ao qual as borrachas naturais e sintéticas são submetidas durante sua fabricação. Esse processo consiste na formação de ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas por meio da adição de enxofre sob aquecimento, resultando em uma estrutura tridimensional altamente estável (Mark; Erman; Eirich, 2014).

Embora essencial para melhorar propriedades como resistência mecânica, durabilidade, elasticidade e estabilidade térmica, especialmente em borrachas naturais e sintéticas como SBR e polibutadieno (Hoffman, 1989; Barnhart, 1985; Ramos 2005), a vulcanização confere caráter termofixo ao material, impedindo sua fusão e remodelagem por processos convencionais. Além disso, o enxofre incorporado à estrutura contribui para a formação de ligações com componentes metálicos, reforçando ainda mais a complexidade estrutural do material (Viana,

2006). Dessa forma, a presença dessas ligações cruzadas dificulta significativamente a degradação e o reaproveitamento, tornando os processos de reciclagem mais complexos e economicamente desafiadores.

Em 2023, fabricantes e importadores colocaram no mercado nacional 88.104.269 unidades de pneus novos, evidenciando o elevado volume de consumo. Como consequência, observa-se a geração expressiva de resíduos, frequentemente descartados de forma inadequada, o que acarreta riscos ambientais significativos e contribui para a ocupação de extensas áreas em aterros sanitários (Lemos et al., 2025).

A regulamentação dos processos relacionados ao gerenciamento e à destinação final desses materiais é relativamente recente, sendo impulsionada, sobretudo, por iniciativas do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (Gameiro et al., 2011). Devido ao seu elevado volume e peso, os pneus inservíveis apresentam dificuldades logísticas quanto ao armazenamento e transporte, o que eleva os custos operacionais. Além disso, quando dispostos em aterros sanitários, podem sofrer deformações e, posteriormente, retornar à sua forma original, ocasionando sua ascensão à superfície. Essa característica, aliada à possibilidade de combustão e ao acúmulo de água em sua estrutura, favorece a proliferação de vetores de doenças, ampliando os impactos ambientais e os riscos à saúde pública.

Os resíduos inservíveis desse material passaram a representar um desafio significativo para as organizações produtoras, especialmente após a promulgação da Lei nº 12.305/2010, que proíbe o descarte inadequado de resíduos sólidos e incentiva a adoção de práticas de gestão ambiental. Assim, com ênfase na reciclagem e na responsabilidade compartilhada, observou-se o estímulo ao investimento em sistemas de logística reversa por parte dessas organizações (Bruneto; Passos, 2016).

3.2.2 Poliestireno Expandido (EPS)

De acordo com a Norma ABNT NBR 10.004 (ABNT, 2004), o EPS é classificado como um resíduo pertencente à classe II B (não inerte). O poliestireno consiste em um material polimérico sólido e transparente, obtido a partir da polimerização do estireno, monômero derivado do benzeno e do etileno, ambos provenientes do petróleo, sendo amplamente conhecido em sua forma expandida (Schmidt, 2012).

Baseia-se em um polímero sintético derivado do petróleo, caracterizado por sua baixa biodegradabilidade (Chakura et al., 2016). Trata-se de um plástico celular rígido, obtido a partir da polimerização do estireno em meio aquoso, cujas pérolas expandidas são constituídas por até 98% de volume de ar e apenas 2% de poliestireno. Em termos estruturais, 1 m³ de EPS pode conter entre 3 e 6 bilhões de células fechadas e preenchidas por ar, o que explica suas propriedades de leveza e isolamento. Além disso, os produtos finais são inodoros, não contaminam diretamente o solo, a água e o ar, sendo ainda passíveis de reaproveitamento e reciclagem, com potencial de retorno à condição de matéria-prima (Knauf Isopor, 2019). É amplamente empregado em diversas aplicações, como materiais de isolamento térmico, embalagens descartáveis (copos e bandejas), caixas térmicas, entre outros usos.

Apesar das propriedades físicas vantajosas associadas à sua estrutura, o EPS apresenta limitações significativas no que se refere à sua reciclagem e destinação final. Embora seja considerado um material inerte durante sua fabricação, sua baixa densidade implica desafios logísticos, especialmente relacionados ao armazenamento, transporte e viabilidade econômica do reaproveitamento (Trigueiro, 2003).

Observa-se também a incorporação gradual de práticas sustentáveis por parte de indústrias e empresas, impulsionadas pelas diretrizes estabelecidas pela PNRS, com o objetivo de reduzir custos de produção e agregar valor aos materiais descartados (Campos; Lima, 2014; Calazans; Silva, 2016; Campos; Borga, 2017; Campos; Orchulak, 2025). Contudo, a destinação inadequada do EPS ainda persiste em diversas regiões do Brasil, comprometendo a efetividade dessas diretrizes (Almeida, 2012; Freitas, 2021).

Devido à sua composição química e, principalmente, à sua baixa densidade, o EPS apresenta elevada suscetibilidade à dispersão por ação eólica, o que favorece seu transporte para diferentes ambientes, incluindo corpos hídricos, onde pode ser confundido com alimento por organismos aquáticos, especialmente peixes (Guedes, 2018). Em razão de seu reduzido valor comercial, esse material frequentemente é negligenciado por catadores de materiais recicláveis, sendo destinado de forma inadequada em diversos locais, o que amplia sua permanência no ambiente e intensifica seus impactos ecológicos (Schmidt, 2012; Lima et al., 2013). Embora sua produção demande baixa quantidade de matéria-prima, os

resíduos de EPS apresentam elevada persistência ambiental, uma vez que não se degradam biologicamente, podendo permanecer por longos períodos no ambiente e fragmentar-se em partículas menores, contribuindo para a poluição por micro resíduos. Além disso, seu acúmulo em lixões e aterros sanitários ocupa grandes volumes, reduz a vida útil dessas áreas e pode favorecer processos de poluição secundária (Grote; Silveira, 2010; Cruz, 2015).

Diante dos desafios apresentados, relacionados às limitações de reciclagem, à persistência ambiental e aos impactos associados ao descarte inadequado do EPS, evidencia-se a necessidade de levantamentos mais detalhados sobre seu manejo ao longo do ciclo de vida. A análise dessas condições é fundamental para subsidiar estratégias que tornem sua gestão mais eficiente e ambientalmente adequada torna-se relevante a discussão de alternativas tecnológicas voltadas à valorização desse material.

3.3 Tecnologias de Valorização de Resíduos

3.3.1 Valorização mecânica

A valorização mecânica de resíduos sólidos consiste em processos físicos de transformação que não alteram a estrutura química dos materiais, permitindo sua reutilização em novas aplicações. No caso dos pneus, diversas tecnologias de reciclagem vêm sendo desenvolvidas para seu tratamento, possibilitando sua conversão em novos produtos e contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais associados ao seu descarte.

Entre as principais tecnologias disponíveis destaca-se a trituração mecânica, que consiste na fragmentação dos pneus em partículas menores, possibilitando sua aplicação em produtos como pisos de borracha e asfalto-borracha. Além disso, esse processo contribui para a separação de seus constituintes, como aço e fibras têxteis, favorecendo o aproveitamento de diferentes frações do material (Barboza et al., 2019).

Uma alternativa promissora para a valorização do EPS consiste na sua incorporação na composição de concretos leves, representando uma alternativa sustentável para o reaproveitamento do poliestireno expandido, material de difícil decomposição e elevado impacto ambiental (Strecker; Silva; Panzera, 2014; Ferraz, 2014; Rocha et al., 2020; Lima et al., 2018). Nessa aplicação, o EPS atua como

agregado leve, promovendo a redução da densidade do material final e contribuindo para a diminuição do peso das estruturas.

Além da redução de massa específica, a incorporação do EPS ao concreto também está associada à melhoria de propriedades funcionais, como isolamento térmico e acústico, o que potencializa sua utilização em elementos não estruturais, tais como enchimentos e revestimentos (Silva et al., 2020). A utilização de EPS reciclado pode otimizar o desempenho térmico desses compósitos, além de reduzir a quantidade de resíduos sólidos destinados ao meio ambiente, reforçando seu potencial como solução sustentável (Zhao; Tang, 2023).

3.3.2 Valorização energética (Coprocessoamento e pirólise)

Entre as principais tecnologias de valorização de pneus inservíveis, que pode ser utilizada também para tratamento do poliestireno expandido, destaca-se o coprocessamento, uma técnica de valorização energética amplamente aplicado na indústria cimenteira. Esse processo consiste na utilização dos pneus como combustível alternativo em fornos de alta temperatura, permitindo a substituição parcial de combustíveis fósseis e contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Além disso, componentes metálicos presentes nos pneus, como o aço, podem ser recuperados e incorporados ao processo produtivo do cimento, agregando valor ao resíduo (Gularte et al., 2017).

Conforme a ABNT NBR 8633:1984, o poder calorífico é um parâmetro que expressa a energia liberada na combustão completa de um combustível. O Poder Calorífico Inferior (PCI) representa a energia efetivamente aproveitável no processo de combustão, desconsiderando o calor recuperado pela condensação do vapor d'água formado durante a queima, sendo o parâmetro mais utilizado em aplicações industriais. Sendo assim, a tabela a seguir demonstra o poder calorífico para esses resíduos comparados ao combustíveis tradicionais utilizados atualmente, permitindo avaliar o potencial energético do EPS e dos pneus inservíveis como alternativas de aproveitamento energético.

Tabela 1. Poder Calorífico Inferior (PCI) de diferentes combustíveis.

Combustível	PCI (MJ/kg)
Pneus Inservíveis	25-35
EPS (Poliestireno Expandido)	40-45
Carvão Mineral	27
Petcoke	32
Gás Natural	39
Madeira	10
Combustível	PCI (MJ/kg)

Fonte: Adaptado de Basel Convention (2011)

Outra tecnologia relevante é a pirólise, que consiste na decomposição térmica dos pneus em ambiente com ausência de oxigênio. Esse processo resulta na obtenção de subprodutos como óleo pirolítico, gás combustível e carvão (negro de fumo), os quais podem ser reaproveitados como fontes energéticas ou insumos na indústria química. Trata-se de uma alternativa promissora por possibilitar a geração de produtos de valor agregado e, simultaneamente, reduzir o impacto ambiental associado ao descarte inadequado (Ferreira et al., 2019).

Adicionalmente, a desvulcanização representa uma alternativa voltada à recuperação da borracha, por meio da quebra das ligações químicas formadas durante o processo de vulcanização. Esse procedimento pode ser realizado por vias mecânicas, químicas ou térmicas, permitindo a obtenção de um material com características próximas à borracha original, o que viabiliza sua reincorporação em novos produtos (Martins et al., 2023).

Por fim, a recauchutagem constitui uma técnica amplamente consolidada, especialmente no setor de transporte, sendo responsável pela extensão da vida útil dos pneus por meio da aplicação de uma nova camada de borracha sobre a carcaça já utilizada. Esse processo reduz significativamente a demanda por novos pneus e contribui para a diminuição do volume de resíduos gerados, apresentando vantagens tanto econômicas quanto ambientais (Rodrigues; Bezerra, 2021). Estudos

recentes também reforçam a relevância dessas tecnologias no contexto da gestão sustentável de resíduos, destacando seu potencial de aplicação em diferentes escalas de produção (Lima, 2025).

3.3.3 Reciclagem do EPS e Limitações Técnicas

Embora o EPS seja tecnicamente reciclável, sua gestão pós-consumo ainda apresenta limitações significativas relacionadas principalmente à sua baixa densidade e aos elevados custos logísticos associados à coleta e ao transporte. Essas características impactam diretamente sua viabilidade econômica em cadeias formais de reciclagem, contribuindo para sua baixa taxa de recuperação em sistemas de gestão de resíduos sólidos.

A reciclagem química tem sido apontada como uma alternativa para o tratamento do EPS, baseando-se no uso de solventes orgânicos capazes de promover a dissolução do polímero, o que favorece a redução de volume e possibilita sua posterior recuperação (Kampouris; Papaspyrides; Lekakou, 1987). Entretanto, a aplicação dessa abordagem é limitada por questões ambientais relacionadas à escolha dos solventes, uma vez que substâncias comumente empregadas, como tolueno, xileno e clorofórmio, apresentam elevada toxicidade e volatilidade, o que reforça a necessidade de investigação e desenvolvimento de alternativas mais seguras e ambientalmente adequadas (Silva, 2021).

De acordo com Sousa (2025), o d-limoneno destaca-se por sua origem natural e por suas propriedades físico-químicas que o tornam adequado para a solubilização do EPS. Além de apresentar baixa toxicidade quando comparado a solventes aromáticos convencionais, sua eficiência na interação com cadeias poliméricas o posiciona como uma alternativa promissora para processos de reciclagem química mais sustentáveis. Estudos indicam que sua aplicação pode reduzir significativamente os riscos ambientais associados ao manuseio de solventes derivados do petróleo, sem comprometer a capacidade de dissolução do material polimérico (Silva, 2021).

Paralelamente, solventes como o acetato de etila também vêm sendo investigados no contexto da reciclagem de polímeros, devido ao seu perfil de toxicidade relativamente menor e à possibilidade de obtenção a partir de rotas parcialmente renováveis. No entanto, sua aplicação ainda depende de uma avaliação mais criteriosa quanto à eficiência de dissolução, estabilidade operacional

e viabilidade econômica em escala industrial, fatores que influenciam diretamente sua adoção em processos de reciclagem de EPS (SILVA, 2021).

Embora existam avanços significativos no desenvolvimento de solventes alternativos, ainda persistem desafios técnicos relevantes para a consolidação da reciclagem química do EPS como solução amplamente aplicável.

3.4 Viabilidade Técnica e Econômica

Ainda que existam alternativas consolidadas na literatura para o reaproveitamento desses materiais, sua implementação prática está condicionada a limitações estruturais, logísticas e mercadológicas que influenciam diretamente sua efetividade (Manzan, 2021).

Do ponto de vista técnico, o EPS apresenta como principal limitação sua baixa densidade (Guedes, 2018), característica que dificulta sua coleta, armazenamento e transporte em sistemas convencionais de gestão de resíduos sólidos. Essa condição reduz significativamente a eficiência dos sistemas de reciclagem, uma vez que grandes volumes desse material correspondem a baixa massa efetiva, tornando o processo logisticamente ineficiente. Embora tecnicamente reciclável, sua transformação depende de processos específicos de densificação ou reciclagem química, os quais demandam infraestrutura adequada e controle operacional rigoroso, o que nem sempre está disponível em nível municipal (Silva, 2021).

No caso dos pneus inservíveis, as limitações técnicas estão associadas principalmente à sua estrutura complexa e ao processo de vulcanização da borracha, que confere elevada resistência mecânica e estabilidade química ao material (Martins et al., 2023). Essa característica, ainda que desejável durante sua vida útil, dificulta sua degradação e processamento em condições convencionais, exigindo tecnologias específicas como trituração, desvulcanização ou tratamentos termoquímicos. Dessa forma, a necessidade de equipamentos especializados e etapas adicionais de processamento impacta diretamente a complexidade operacional das rotas de valorização.

Sob a perspectiva econômica, observa-se que os custos logísticos representam um dos principais entraves à viabilidade desses sistemas (Manzan,

2021) especialmente no caso do EPS, cujo baixo peso específico inviabiliza economicamente o transporte em longas distâncias sem compactação prévia.

Os custos associados à implantação e operação de tecnologias de reciclagem, incluindo consumo energético, manutenção de equipamentos e necessidade de mão de obra especializada, influenciam diretamente a competitividade dessas soluções frente ao descarte convencional ou ao uso de matérias-primas virgens (Abiplast, 2024).

Outro fator importante refere-se à baixa atratividade comercial de determinados materiais reciclados, o que limita a formação de mercados consolidados para absorção desses produtos. No caso do EPS, mesmo quando reciclado, seu valor agregado tende a ser reduzido, o que compromete sua inserção em cadeias produtivas maiores (Santos, 2020). Situação semelhante pode ser observada na reciclagem de pneus, cuja viabilidade econômica depende fortemente da escala de produção e da existência de demanda industrial específica

A viabilidade técnica foi avaliada pela aplicabilidade das tecnologias e pelos requisitos de infraestrutura, enquanto a viabilidade econômica foi analisada qualitativamente, considerando custos, escala operacional e potencial de geração de valor. a viabilidade técnica foi avaliada pela aplicabilidade das tecnologias e pelos requisitos de infraestrutura, enquanto a viabilidade econômica foi analisada qualitativamente, considerando custos, escala operacional e potencial de geração de valor.

3.5 Logística Reversa e Economia Circular na Gestão de Resíduos Sólidos

3.5.1 Logística Reversa de pós-consumo

A logística reversa pode ser compreendida como o conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial para reaproveitamento em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada (Brasil, 2010). Diferentemente da logística direta, que organiza o fluxo de produtos do fabricante ao consumidor, a logística reversa opera no sentido inverso: do ponto de descarte ou pós-consumo até os centros de reprocessamento, reciclagem ou disposição final.

A logística reversa é o processo de planejamento, implementação e controle eficiente do fluxo de matérias-primas, estoques em processo, produtos acabados e informações relacionadas, do ponto de consumo até o ponto de origem, com o propósito de recuperar valor ou realizar a destinação adequada. (Rogers; Tibben-Lembke, 1999) Essa definição ressalta dois elementos centrais: a eficiência do fluxo reverso e a recuperação de valor, aspectos que se mostram especialmente relevantes no contexto de materiais de difícil degradação, como pneus inservíveis e poliestireno expandido (EPS).

Um dos pilares da logística reversa pós-consumo é o princípio da responsabilidade estendida do produtor (REP), pelo qual fabricantes e importadores assumem obrigações pelo ciclo de vida completo de seus produtos, incluindo o gerenciamento dos resíduos gerados após o uso pelo consumidor (Juntunen et al, 2023). No Brasil, esse princípio encontra respaldo direto na PNRS.

Para os pneus, a Reciclanip opera por meio de pontos de coleta distribuídos em borracharias, revendedoras e postos credenciados, articulando a cadeia reversa entre os geradores e as empresas destinatárias.

Para o EPS, o marco regulatório mais recente é o Decreto Federal n.º 12.688/2025, que institui o Sistema de Logística Reversa de embalagens plásticas, determinando que fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes são responsáveis por estruturar, implementar e operar sistemas de recolhimento e destinação das embalagens pós-consumo. O decreto prevê, ainda, a expansão dos Pontos de Entrega Voluntária (PEVs) a todos os municípios do país até 2029, o que representa um avanço regulatório relevante para materiais de baixa atratividade comercial, como o isopor.

3.5.2. - Economia Circular

A Economia Circular é o modelo econômico restaurativo e regenerativo que busca minimizar os impactos e o desperdício, utilizando os recursos da melhor forma possível, propondo uma alternativa ao modelo linear de produção e visando promover o engajamento de pessoas e de governos com a promoção de políticas públicas (Abdalla; Freire Sampaio, 2018).

Este modelo linear tradicional de produção, baseia-se em um ciclo de extração, transformação, consumo e descarte do material, desconsiderando a limitação dos recursos naturais e energéticos disponíveis. A economia circular atua

justamente buscando promover o equilíbrio entre os sistemas econômico, social e ambiental, permitindo a reinserção do material ao ciclo produtivo através de estratégias que promovam a redução, reutilização e reciclagem. (Gonçalves; Barroso, 2019).

No ciclo da Economia Circular, os materiais, energia, produtos, tudo é continuamente reutilizado, diminuindo a necessidade de extração de novos recursos e consequentemente a geração de resíduos, aumentando a eficiência produtiva. (Kirchherr et al., 2017)

Os resíduos sólidos compõem um dos principais grupos causadores de degradação ambiental, devido tanto ao grande volume gerado, quanto ao tratamento e destinação inadequada dada (SANTOS, et al., 2015).

Lagarinhos (2011) descreve que a aplicação da Economia Circular pode trazer diversos benefícios econômicos e ambientais, reduzindo significativamente a quantidade de resíduos descartados em aterros sanitários e diminuindo a pressão sobre os sistemas de gestão de resíduos e o impacto ambiental dos aterros. Assim como também promove oportunidades de geração de empregos através do processo de coleta e processamento, até fabricação de novos produtos, contribuindo para o desenvolvimento econômico e social e geração de renda.

Dessa forma, sob a perspectiva da Economia Circular, buscou-se compreender a viabilidade das principais técnicas de reaproveitamento de pneus inservíveis e EPS para o município de Itapeva, considerando critérios relacionados à complexidade dos processos, à necessidade de infraestrutura, aos aspectos econômicos e ao potencial de aplicação na realidade local.

A análise das alternativas permitiu identificar as tecnologias mais compatíveis com as características do município. Para os pneus inservíveis, o coprocessamento destacou-se por demandar menor processamento local, possuir uma cadeia logística já consolidada e permitir o aproveitamento energético e material dos resíduos em escala industrial. Para o EPS, a incorporação em concreto leve apresentou maior potencial devido à simplicidade do processo, ao baixo custo de implementação e à possibilidade de agregação de valor ao resíduo, favorecendo sua aplicação na construção civil.

4 METODOLOGIA

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza exploratória e descritiva, com abordagem qualitativa, estruturada sob a forma de estudo de caso aplicado ao município de Itapeva - SP. A investigação tem como propósito examinar a viabilidade técnica, ambiental e econômica de alternativas destinadas ao reaproveitamento de pneus inservíveis e isopor no município de Itapeva considerando os princípios da logística reversa e da economia circular.

A primeira etapa consistiu em pesquisa bibliográfica e documental, com base na análise de artigos científicos, teses, dissertações, relatórios técnicos de órgãos ambientais, como o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), além de publicações de associações ligadas à reciclagem, documentos institucionais e legislações vigentes relacionadas à Política Nacional de Resíduos Sólidos e à logística reversa.

A segunda etapa envolveu a coleta de dados primários por meio de visita técnica ao local de armazenamento temporário de pneus inservíveis do município de Itapeva - SP. Durante a visita, foram realizadas observações diretas das condições de armazenamento, organização do estoque e fluxo operacional dos resíduos. Também foi conduzida entrevista semiestruturada com a responsável pelo setor, buscando compreender o funcionamento da cadeia reversa local.

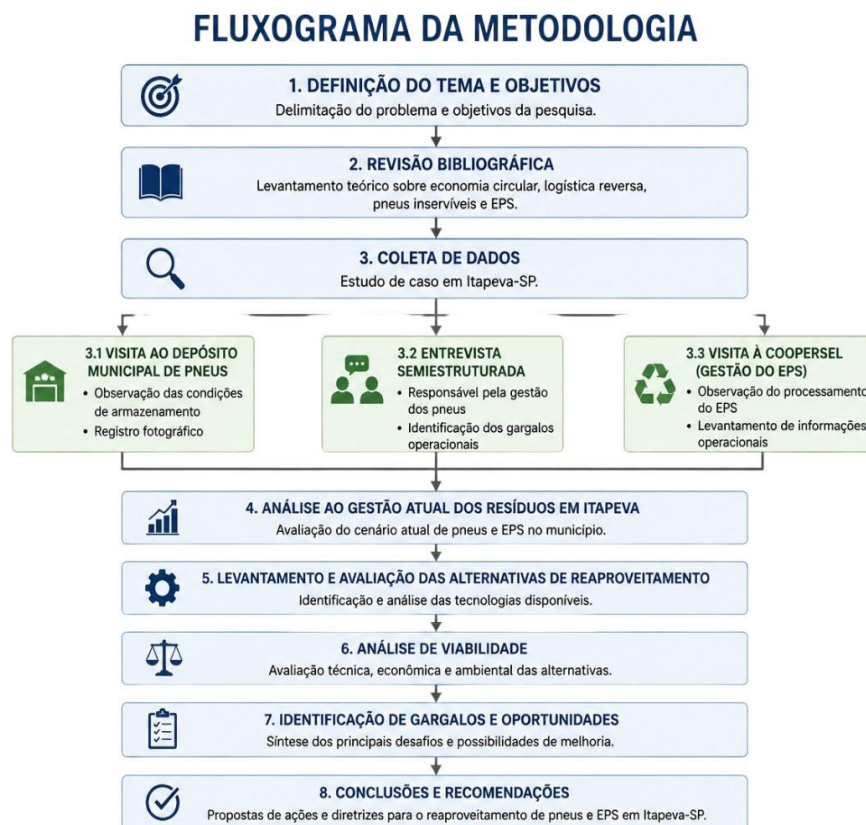
As principais questões abordadas durante a entrevista foram:

- I. Estrutura atual do sistema de coleta e armazenamento;
- II. Dificuldades operacionais e logísticas;
- III. Capacidade de recebimento e estocagem;
- IV. Destinação final adotada;
- V. Frequência de retirada dos resíduos.

Além da entrevista, foram realizados registros fotográficos do local, com o objetivo de documentar as condições físicas do estoque, o volume acumulado de resíduos e os procedimentos adotados. Esses registros serviram como base para a análise das condições operacionais e para a avaliação da conformidade com as normas ambientais vigentes.

A partir dessa análise comparativa, foram avaliadas as principais tecnologias disponíveis para o reaproveitamento dos resíduos sólidos, visando propor alternativas compatíveis com a realidade do município.

Figura 1 - Fluxograma da Metodologia



4.1 Estudo de caso

4.2 Análise de componentes dos pneus

Os pneus automotivos são produtos desenvolvidos com objetivo de garantir uma elevada resistência mecânica, proporcionando durabilidade, segurança operacional e desempenho para diferentes condições de uso, para isso, sua composição é feita a partir de uma combinação complexa de materiais. Mais de 200 ingredientes podem integrar o pneu, desempenhando funções vitais em segurança, eficiência de combustível, desempenho e respeito ao meio ambiente. Sua porcentagem varia de acordo com o tipo de pneu a ser fabricado. (Michelin, 2026)

Seus componentes podem ser agrupados em duas estruturas principais, sendo o conjunto de banda de rodagem e a carcaça, elementos formados em várias camadas, assim como representado na Tabela 2:

Tabela 2. Componentes da estrutura do pneu

Componente	Material principal
Banda de rodagem	Borracha natural e sintética (SBR), negro de fumo, sílica
Cintas (belts)	Fios de aço de alta resistência revestidos com borracha
Carcaça	Fibras têxteis (poliéster, nylon ou rayon) + borracha
Flancos (laterais)	Borracha flexível com aditivos
Talões	Aço de alta resistência revestido com borracha
Revestimento interno	Borracha butílica (baixa permeabilidade ao ar)

Fonte: Adaptado pelo autor com base em CONTINENTAL PNEUS (s.d.) e (MICHELIN, [s.d.])

4.2.2 Análise de componentes do isopor

O poliestireno expandido, popularmente conhecido como Isopor® é um termoplástico moldado com o seu aquecimento e expandido com o poliestireno, é produzido a partir de pequenos grânulos à base de petróleo.

De acordo com a Associação Brasileira de Poliestireno Expandido (Abrapax, 2023), o EPS não apresenta substâncias tóxicas ou nocivas ao meio ambiente, e seu processo de fabricação não utiliza CFCs, sua estrutura é composta predominantemente por volume de ar, cerca de 98%, enquanto apenas aproximadamente 2% corresponde ao material plástico.

Além disso, os produtos finais são inodoros, não contaminam diretamente o solo, a água e o ar, sendo ainda passíveis de reaproveitamento e reciclagem, com potencial de retorno à condição de matéria-prima (Knauf Isopor, 2019).

Em vez de se decompor, o material sofre fragmentação ao longo do tempo, originando partículas cada vez menores, conhecidas como microplásticos. Essas partículas persistem no meio ambiente, podendo contaminar o solo e os

corpos d'água, além de serem ingeridas por animais, o que pode causar impactos negativos à fauna e ao equilíbrio ambiental (Epssole, 2025)

TABELA 3. Componentes químicos e físicos do isopor

Estrutura Química	• Fórmula Química - C_8H_8 • Poliestireno - Polímero sintético termoplástico derivado do petróleo. • Agente Expansor: Pentano, utilizado para expandir as pérolas de poliestireno em até 50 vezes o seu tamanho. • Composição de 98% de ar encapsulado e 2% de plástico. • Aditivos (Opcionais) - Corantes, antioxidantes, estabilizadores térmicos.
Estrutura Física	• Leveza • Isolante Térmico • Baixa Densidade • Resistência Mecânica média

Fonte: Epssole, 2024.

4.3 Gestão dos Resíduos em Itapeva - SP (Pneus)

A visita técnica realizada ao local de armazenamento temporário de pneus inservíveis do município de Itapeva - SP possibilitou a identificação das condições estruturais e operacionais atualmente adotadas na gestão desse resíduo. O espaço utilizado corresponde a um galpão pertencente à administração municipal, não havendo infraestrutura especificamente para o armazenamento de pneus, sendo a estrutura existente provisória e adaptada.

No momento da inspeção, foram identificadas duas baias principais de estocagem. Na Baía 1 encontravam-se aproximadamente 600 pneus, enquanto na Baía 2 estavam armazenadas cerca de 1.200 unidades, incluindo pneus de automóveis e motocicletas, totalizando aproximadamente 1.800 pneus acumulados no depósito municipal, conforme as Figuras 1 e 2:

Figura 2. Armazenamento de pneus do depósito municipal de Itapeva



Fonte - Elaborado pelo autor, 2026.

Figura 3. Armazenamento de pneus do depósito municipal de Itapeva



Fonte - Elaborado pelo autor, 2026.

Observou-se que o empilhamento ocorre de forma irregular, sem cobertura adequada e sem sistema formal de controle de entrada e saída dos resíduos, tampouco registro sistematizado de inventário ou monitoramento do tempo

de permanência dos pneus no local, o que limita a rastreabilidade e o planejamento logístico.

Ainda conforme o relato da responsável pelo setor, a coleta e o armazenamento enfrentam restrições estruturais decorrentes da ausência de infraestrutura apropriada. A operação da logística reversa depende da atuação da empresa ANIP – Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos, encarregada da retirada e encaminhamento dos pneus para destinação final ambientalmente adequada, entretanto, foi informado que a empresa não recebe pneus importados, apenas os fabricados por empresas brasileiras, nem aqueles que apresentam arames expostos, o que restringe o volume efetivamente aceito e contribui para o acúmulo de material no depósito municipal.

Além disso, a retirada ocorre de forma esporádica, sem periodicidade previamente estabelecida, mantendo o município dependente da disponibilidade da destinadora ou de eventuais compradores interessados. Destacou-se, ainda, que empresas que anteriormente realizavam a coleta, como a “Itapeva Recicla” deixaram de operar, reduzindo as alternativas de escoamento.

Outro aspecto relevante refere-se à menor atratividade comercial dos pneus de automóveis, o que dificulta sua negociação no mercado secundário. O tempo médio de permanência dos pneus no depósito foi estimado em aproximadamente um mês, podendo se prolongar em períodos de menor demanda.

Durante a visita, mencionou-se que a adoção de equipamentos específicos, como máquinas de trituração e compactação, poderia otimizar o armazenamento, reduzir o volume ocupado e ampliar as possibilidades de destinação. Contudo, o município atualmente não dispõe dessa estrutura, o que reforça a necessidade de avaliação de estratégias, investimentos e parcerias que possibilitem a reinserção do material no ciclo produtivo, possibilitando a economia circular desse resíduo.

4.4 Alternativas de Economia Circular para Pneus Inservíveis

A Resolução CONAMA nº 258/1999 estabelece que pneu inservível é aquele que “apresente danos irreparáveis em sua estrutura não se prestando mais à rodagem” (Brasil, 1999). Ou seja, ele já não tem condições de voltar ao uso original

e precisa obrigatoriamente ser destinado a algum processo de tratamento ou reaproveitamento.

Segundo o IBAMA (2024), esses processos permitem converter um resíduo de elevada complexidade técnica em insumos industriais de relevante interesse econômico, tais como borracha moída, aço recuperado e energia térmica. Esses subprodutos apresentam aplicações consolidadas na construção civil, na pavimentação asfáltica, na indústria de polímeros e no setor cimenteiro, ampliando significativamente as possibilidades de reinserção produtiva dos pneus descartados.

Sob a perspectiva da Economia Circular, a compreensão das alternativas de destinação ambientalmente adequada exige a análise do ciclo do pneu, desde sua fabricação até o estágio de descarte e pós-consumo.

A Tabela 4 apresenta as principais etapas desse ciclo e sua respectiva caracterização:

Tabela 4. Ciclo do pneu

Etapa	Caracterização
Produção	Fabricação do pneu com matérias-primas como borracha, fibras têxteis, aço e aditivos, realizada pela indústria de pneus.
Distribuição	Envio dos pneus para o mercado por meio de fabricantes, distribuidores e comerciantes.
Consumidor	Pneu utilizado em veículos por consumidores durante sua vida útil, sujeito a desgaste e manutenção conforme seu uso.
Pneu Inservível	Considera-se pneu inservível aquele que atingiu o fim de sua vida útil, sem possibilidade de reutilização, exigindo destinação ambientalmente adequada
Coleta	Recolhimento dos pneus inservíveis por pontos de coleta, borracharias ou sistemas de logística reversa
Reaproveitamento	A logística reversa dos pneus permite seu retorno ao ciclo produtivo, viabilizando o reaproveitamento e reduzindo o descarte inadequado, pode ser feita por meio de técnicas como coprocessamento, laminação, granulação.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Reciclanip e IBAMA

4.4.1 Reciclagem Energética (Coprocessoamento de Pneus Inservíveis)

O coprocessamento constitui uma das principais técnicas adotadas no Brasil para a destinação ambientalmente adequada de pneus inservíveis. Regulamentado pelo IBAMA e reconhecido pela Resolução CONAMA nº 499/2020 como tecnologia ambientalmente segura, o coprocessamento é amplamente aplicado em escala industrial no país (Ibama, 2025).

O coprocessamento constitui na recuperação simultânea de energia e na reciclagem de recursos minerais quando usados para substituir os combustíveis fósseis primários em fornos de cimento por meio da substituição de matéria-prima, ou como fonte energética. (Freitas e Nobrega, 2014)

Essa técnica ocorre pela introdução controlada de resíduos, como os pneus inservíveis, nos fornos rotativos de produção de clínquer, onde são utilizados como combustível alternativo. Dentro do forno, em temperaturas que podem ultrapassar de 1400 °C, junto com o tempo em que o material permanece no processo, a mistura dos gases permite a queima completa dos componentes orgânicos dos pneus, aproveitando sua energia de forma eficiente. (ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland)

No caso específico dos pneus, o coprocessamento de pneus inservíveis em fornos de clínquer consiste na utilização desses resíduos como combustível alternativo na indústria cimenteira esse processo permite substituir parcialmente os combustíveis fósseis, como carvão e óleo, possibilitando uma redução de custos e de impactos ambientais. (Lagarinhos; Espinosa; Tenório, 2016).

Além do aproveitamento energético, todo o aço presente nos pneus é incorporado ao clínquer durante o processo, eliminando a necessidade de separação prévia dos materiais. O ambiente do forno, caracterizado por altas temperaturas e condições alcalinas, favorece a decomposição segura dos resíduos, dificultando a formação de compostos tóxicos. (Lagarinhos; Espinosa; Tenório, 2016)

Devido ao seu elevado poder calorífico inferior (PCI), a utilização de pneus inservíveis para coprocessamento como fonte energética se torna uma das opções mais viáveis para sua destinação, além disso, as condições operacionais dos fornos de clínquer favorecem a completa queima desse material, garantindo seu aproveitamento energético (Lamas; Palau; Camargo, 2013).

No Brasil, no ano de 2025, foram enviados para o coprocessamento 321.953,51 toneladas de pneus inservíveis, sendo essa tecnologia equivalente a 41,06% da destinação do resíduo no país (Ibama, 2025).

O coprocessamento pode representar uma alternativa viável para o município de Itapeva, visto que não demanda infraestrutura própria e reduz o passivo ambiental acumulado. De acordo com Cembureau (2016), o coprocessamento pode resolver três principais problemas ambientais:

- Redução das alterações climáticas: O coprocessamento auxilia na diminuição das emissões de gases de efeito estufa ao substituir combustíveis fósseis
- Redução do volume de resíduos depositados em aterros sanitários
- Proporciona a economia circular: Os resíduos são utilizados nas fábricas de cimento e não precisam ser aterrados.

4.4.2 Reciclagem Mecânica de Pneus (Granulação)

A granulação de pneus é um processo de reciclagem mecânica que consiste na trituração dos pneus inservíveis até a obtenção de partículas de borracha em diferentes granulometrias. Esse processo é amplamente utilizado devido à sua simplicidade operacional e à possibilidade de reaproveitamento direto do material, essa alternativa permite destinar ambientalmente os pneus descartados e, ao mesmo tempo, melhorar o desempenho do pavimento (BERNUCCI et al., 2010).

Os pneus usados são cortados em lascas ou raspas que passam por um processo de moagem mecânica, onde são transformados em pó-de-borracha e tratados por um sistema de separação com peneiras e cilindros magnéticos. (Lagarinhos; Tenório, 2008)

Os grânulos de borracha obtidos em diferentes granulometrias podem ser aplicados em diversas áreas, como na produção de misturas asfálticas (asfalto-borracha), pisos industriais, áreas recreativas, campos de futebol sintético, além da fabricação de tapetes automotivos, solados de calçados e outros produtos derivados da borracha. (Reciclanip, s.d.)

De acordo com Bernucci et al. (2010), a borracha pode ser incorporada ao ligante asfáltico pelo processo úmido, formando um ligante modificado, ou adicionada diretamente à mistura pelo processo seco. A presença da borracha

contribui para maior elasticidade, resistência à deformação e aumento da durabilidade do revestimento asfáltico.

A aplicação desse método representa uma alternativa relevante ao material, inserindo o resíduo como insumo em obras de infraestrutura (Lagarinhos; Tenório, 2008),

Entretanto, sua implementação exigiria uma infraestrutura específica para produção e controle, incluindo equipamentos de aquecimento, de mistura e de armazenamento, gerando custos elevados de investimento e operação, como rolos compactadores, os termômetros para controle de temperatura, os caminhões espargidores, veículos de transporte dos insumos e da mistura asfáltica. (Santos; Silva; Silva, 2017)

No contexto do município de Itapeva - SP, sua aplicação traria limitações significativas devido ao seu custo de aplicação e necessidade de grandes volumes. Embora vantajosa e ambientalmente adequada, a alternativa apresenta viabilidade econômica restrita, podendo ser considerada mediante articulação regional ou contratação de serviços de terceiros.

4.4.3 - Laminação

A laminação é um processo mecânico de reaproveitamento de pneus inservíveis que consiste na transformação da borracha em mantas ou lâminas contínuas. Esse processo inclui etapas de corte e separação dos componentes, possibilitando o aproveitamento da borracha em diferentes formas para reutilização.

Após essa etapa, o material é submetido a equipamentos laminadores que promovem o achatamento da borracha, podendo ainda passar por processos de limpeza e acabamento para melhorar a qualidade final. O produto obtido pode ser aplicado em revestimentos, pisos, tapetes, solados de calçados e outros artefatos, contribuindo para a valorização do resíduo e sua reinserção no ciclo produtivo (Reciclanip 2026; Lagarinhos, 2008).

Essa técnica é considerada uma tecnologia de baixo custo, quando comparada a outros métodos de reaproveitamento, pois apresenta menor complexidade operacional e menor necessidade de investimento em equipamentos, favorecendo sua aplicação em diferentes escalas industriais. Esse processo requer,

basicamente, máquinas de corte, separadores metálicos e equipamentos laminadores, que realizam o achatamento da borracha. (Nerasti; Martins, 2017)

A tecnologia pode ser considerada economicamente viável, porém apresenta limitações técnicas para o município como Itapeva, visto que a laminação é um processo utilizado principalmente com pneus diagonais (convencionais), que são os pneus que não têm cintas de aço em sua estrutura (Grupo Greener, 2024)

A frota brasileira moderna é predominantemente de pneus radiais. O depósito municipal de Itapeva é composto majoritariamente por pneus radiais. Isso significa que a laminação não seria viável à maior parte do estoque existente.

4.5 Gestão de Resíduos em Itapeva (EPS)

No município de Itapeva, a gestão do isopor (EPS) envolve principalmente a atuação de cooperativas, como a Coopersel, que trabalha em parceria com catadores e cooperados responsáveis pela coleta seletiva e triagem dos resíduos. A cooperativa realiza a separação dos materiais recicláveis conforme os procedimentos exigidos pela legislação ambiental, garantindo a conformidade dos processos. Além disso, grandes estabelecimentos comerciais contam com cooperados específicos para a coleta de recicláveis.

O município dispõe também de dois Pontos de Entrega Voluntária (PEVs), embora tenha sido relatado que parte da administração pública e da população desconhece plenamente a existência e a função desses pontos.

Figura 4. Estoque do EPS



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

Segundo informações obtidas junto à cooperativa, o volume total de resíduos coletados mensalmente situa-se entre 80 e 90 toneladas, considerando todos os materiais recicláveis processados. O isopor é acondicionado em caixas com aproximadamente 20 kg cada e, após a triagem, é encaminhado para prensagem, etapa fundamental para reduzir seu volume e viabilizar o transporte e a comercialização.

Após a coleta, o isopor passa por processo de triagem manual realizado pelos cooperados, sendo posteriormente prensado até atingir o limite operacional dos equipamentos disponíveis. O material que não encontra comprador imediato permanece estocado na cooperativa, o que evidencia limitações de mercado para esse tipo de resíduo, apesar de seu potencial de reciclagem.

Figura 5. Prensagem do EPS



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

No aspecto econômico, foi relatado que o valor de comercialização do isopor é reduzido, em torno de R\$0,30 por unidade de referência adotada pela cooperativa, o que torna pouco atrativa a negociação isolada desse material. Em função disso, a venda do isopor geralmente ocorre de forma conjunta com outros recicláveis de maior valor agregado, como o PET, estratégia necessária para tornar o transporte e a comercialização economicamente viáveis. Essa limitação evidencia um dos principais entraves à ampliação da reciclagem de EPS no município.

Figura 6. Isopor prensado e separado para comercialização



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

4.5.1 Alternativas de Economia Circular para Isopor

O novo Decreto Federal 12.688/2025, publicado em 21 de outubro de 2025, regulamenta os artigos 32 e 33 da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010) e institui o Sistema de Logística Reversa (SLR) de embalagens de plástico. Esse decreto, determina que fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes são responsáveis por estruturar, implementar e operar sistemas de recolhimento e destinação das embalagens pós-consumo.

Um dos pilares do decreto é a expansão dos Pontos de Entrega Voluntária (PEVs), com previsão de implantação em todos os municípios até 2029, conforme critérios populacionais e de infraestrutura. Além disso, destaca-se o papel desses pontos na conscientização dos consumidores quanto à economia circular, incentivando práticas como reúso, reaproveitamento e descarte adequado.

A reciclagem dessas embalagens permite sua reinserção como matéria-prima na produção de novos produtos, reduzindo a extração de recursos naturais, os impactos ambientais e contribuindo para a geração de emprego e renda. (Abiplast, 2021)

Para isso, sob a perspectiva da Economia Circular, a compreensão das alternativas de destinação ambientalmente adequada exige a análise do ciclo do

EPS, desde sua fabricação até o estágio de descarte e pós-consumo, conforme a Tabela 5:

Tabela 5. Ciclo do EPS.

Etapas	Caracterização
Consumo	Utilização de produtos feitos de Poliestireno Expandido (EPS) pelo consumidor, gerando resíduo após o uso.
Descarte	Destinação do material pelo usuário, podendo ocorrer de forma adequada (separação) ou inadequada (mistura com rejeitos).
PEV (Ponto de Entrega Voluntária)	Local destinado à coleta seletiva, onde o resíduo é concentrado e encaminhado corretamente, reduzindo perdas e dispersão.
Triagem	Separação, limpeza e classificação do EPS para garantir qualidade no reaproveitamento.
Transporte	Envio do material para unidades de processamento ou reaproveitamento.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

No Brasil, estima-se que cerca de 34,5% do poliestireno expandido (EPS) seja reciclado anualmente, o que corresponde a aproximadamente 13,5 mil toneladas de material reaproveitado. Esse índice, no entanto, pode ser ampliado por meio do descarte adequado. O EPS reciclado pode ser utilizado na fabricação de novos produtos plásticos, além de aplicações como colas, solventes, solados de calçados e geração de energia térmica. Dessa forma, a destinação correta, por meio da coleta seletiva ou de pontos específicos para plásticos é fundamental para viabilizar sua re inserção na cadeia produtiva (Knauf Isopor)

4.5.2 Reciclagem Mecânica

De acordo com Indústria Santa Luzia (2022) e Mundo Isopor (2024) , o processo é estruturado em etapas físicas de:

- Coleta e Triagem - Identificação e separação do EPS de outros resíduos, garantindo que o material esteja livre de contaminantes como colas ou restos orgânicos.
- Redução Volumétrica - Sem a compactação ou degasagem, o transporte torna-se logisticamente inviável e economicamente proibitivo, pois grandes volumes representam uma massa muito pequena.

- Moagem e Extrusão - O material compactado é triturado e, em seguida, fundido por aquecimento em uma máquina extrusora. Ao final, é cortado em grãos (pellets) de poliestireno rígido.
- Reaproveitamento - O EPS triturado que estiver em boas condições, ou seja, isentos de impurezas e contaminação, serão reaproveitados misturando-se na matéria prima virgem para a fabricação de blocos voltados para a construção civil.

A reciclagem mecânica apresenta diversas vantagens no contexto da gestão de resíduos plásticos, destacando-se pela redução da extração de recursos naturais e pela reinserção de materiais na cadeia produtiva, contribuindo para diminuição do volume de resíduos destinados a aterros e lixões e favorecendo a geração de empregos ao longo da cadeia de reciclagem, sendo a mais comum e industrialmente consolidada, (Shamsuyeva; Endres, 2021)

Embora eficiente na redução de resíduos, a reciclagem mecânica impõe desafios termomecânicos, como a cisão de cadeias poliméricas e a oxidação, o que pode resultar na degradação das propriedades do material a cada novo ciclo de processamento. Os processos são limitados pelo custo, pela degradação das propriedades mecânicas e pela inconsistência na qualidade dos produtos (Schyns; Shaver, 2021)

As plantas de reciclagem mecânica são simples e de baixo custo, com demanda relativamente baixa de energia e recursos em comparação com as plantas necessárias para reciclagem química ou física. (Shamsuyeva; Endres, 2021)

4.5.3 Reciclagem Química

A reciclagem química utiliza o princípio de solubilização por solventes, sendo vantajosa pela redução do volume das espumas semi rígidas, o que facilita o transporte, a qualidade do produto obtido e possibilidade de retirada de aditivos e impurezas (Kampouris; Papaspyride; Lekakou, 1988).

- Triagem e Pré-tratamento: Diferente da mecânica, a reciclagem química é mais tolerante a contaminantes, mas ainda exige a remoção de resíduos

grosseiros não poliméricos. O EPS é limpo para evitar subprodutos indesejados nas reações químicas (Mundo Isopor)

- Dissolução ou Liquefação (Opcional): O EPS pode ser dissolvido em solventes específicos (como limoneno ou outros hidrocarbonetos) para reduzir seu volume e facilitar a entrada no reator. Isso quebra a estrutura física "expandida" e transforma o isopor em um fluido denso. (Achilas et al., 2007)
- Ruptura Molecular (Reação Química) - Através de calor extremo (pirólise) ou agentes químicos (catalisadores), as cadeias longas de plástico são "quebradas" até voltarem ao seu estado original de monômero (estireno). (Schyns; Shaver, 2021)
- Repolimerização - O estireno recuperado é destilado para atingir pureza total e depois polimerizado novamente. O resultado é um plástico com qualidade idêntica ao virgem, pronto para ser expandido novamente em isopor. (Plastics Europe, 2024)

Diferente da abordagem mecânica, a reciclagem química permite a obtenção de materiais com níveis de pureza e propriedades mecânicas equivalentes aos do polímero virgem, sendo capaz de processar fluxos de resíduos mais complexos ou contaminados (Schyns; Shaver, 2021), PLASTICS EUROPE (2024) aponta a etapa de polimerização como a chave para a economia circular infinita de plásticos.

No entanto, os métodos de reciclagem química ainda não estão estabelecidos e sua posição dentro da economia circular ainda não foi definitivamente definida, entre as principais limitações da reciclagem química destacam-se o alto consumo energético, a necessidade de instalações industriais complexas e o emprego de solventes específicos no processo. A reciclagem química é utilizada principalmente para a reciclagem de PET, PE e PP pós-consumo (Shamsuyeva; Endres, 2021)

4.5.4 Reciclagem Energética (Coprocessoamento de EPS)

O poliestireno expandido tem elevado poder calorífico para ser aproveitado na geração de eletricidade e/ou calor. Esse é o princípio que torna possível a reciclagem energética do EPS, método com custos elevados e que

demanda plantas devidamente preparadas. Apesar de suas vantagens, o procedimento ainda não é utilizado no Brasil em larga escala (Industria Santa Luzia, 2024)

Os resíduos de poliestireno expandido são depositados num forno industrial capaz de atingir temperatura de até 1.000 °C. A queima gera gases quentes, posteriormente aspirados por caldeiras de recuperação que os transformam em vapor. O sistema tem ainda turbinas com pás que são movimentadas pelo vapor e é justamente essa energia cinética que acaba gerando eletricidade ou calor — dependendo da tecnologia empregada (Aecweb, 2021).

O poliestireno expandido também apresenta características físico-químicas ideais para o coprocessamento em fornos de clínquer, atuando como um substituto de combustíveis fósseis tradicionais, como o coque de petróleo. Segundo a Associação Brasileira de Cimentos Portland (2022), o alto poder calorífico do EPS permite a sua valorização energética integral, onde a alta temperatura do forno garante a destruição térmica completa do polímero, enquanto seus resíduos minerais remanescentes são incorporados quimicamente à matriz do cimento, sem a geração de novos passivos ambientais ou cinzas.

Em geral, essa abordagem é preferida, especialmente no caso de resíduos altamente contaminados ou falta de logística de tratamento e triagem de resíduos. (Shamsuyeva; Endres, 2021). Para o contexto de Itapeva, a reciclagem energética pode ser uma solução viável tanto para Isopores quanto para Pneus.

Com base nos resultados obtidos, propõem-se as seguintes recomendações práticas para o município de Itapeva:

- Fortalecer a Coopersel com apoio técnico e operacional para ampliação da capacidade de compactação do EPS, viabilizando melhores condições de negociação no mercado secundário;
- Implementar campanha de comunicação sobre os PEVs existentes e sobre a correta separação do EPS na fonte, envolvendo comércio, condomínios, órgãos públicos e escolas;
- Explorar, em médio prazo, parcerias com construtoras e universidades da região para desenvolvimento de compósitos de concreto leve com EPS

reciclado, testando a viabilidade técnica e econômica dessa aplicação no contexto local;

- Criação de um circuito local de coleta seletiva porta a porta, em parceria entre a Coopersel, o poder público municipal e os grandes geradores comerciais como supermercados, distribuidoras e indústria

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Pneus

A análise integrada entre o diagnóstico operacional realizado no depósito municipal de Itapeva e a revisão das tecnologias de reaproveitamento disponíveis permite identificar os principais gargalos da cadeia reversa local e apontar caminhos concretos para sua superação.

O primeiro aspecto crítico identificado refere-se à ausência de infraestrutura adequada para o armazenamento dos pneus inservíveis. Conforme observado na visita técnica, o depósito municipal opera com estoque estimado em 1.800 unidades, empilhadas de forma irregular, sem cobertura plena e sem sistema formal de controle de entrada e saída.

Essa condição, além de criar risco sanitário, especialmente quanto à proliferação do *Aedes aegypti*, compromete a rastreabilidade do resíduo e o planejamento logístico para sua destinação.

Em 2024, as tecnologias de destinação final mais relevantes são Coprocessamento, Granulação, e Laminação, respectivamente, sendo o mais utilizado no Brasil o Coprocessamento, como destaca o Relatório de pneumáticos do Ibama de 2024 na tabela 6:

Tabela 6. Tecnologia de destinação final e quantidade total de pneus inservíveis destinados

Tecnologia	Destinação (t)	Percentual (país)
Coprocessamento	321.953,51	41,06%
Granulação	227.469,64	29,01%
Laminação	209.222,54	26,68%

Pirólise	25.465,88	3,25%
Total	784.111,58	100%

Fonte: Relatório de Pneumáticos (Ibama, 2024)

Visto o cenário municipal, observa-se que Itapeva tem como principal entrave na logística reversa a forma como o sistema operacional está estruturado localmente. Embora a ANIP seja responsável pela gestão nacional da logística reversa de pneumáticos, sua atuação depende da organização adequada dos pontos de coleta e do atendimento a critérios operacionais, como volume mínimo para retirada, condições de armazenamento e não aceitação de determinados tipos de pneus.

De acordo também com o que foi relatado em visitas técnicas e entrevistas, o município apresenta também grandes dificuldades logísticas e econômicas que possibilitem a aplicação imediata de técnicas para resolução dos problemas, sendo mais viável a curto prazo parcerias estratégicas que lidem com o gargalo logístico; transporte e infraestrutura;

Com base nisso, para os pneus inservíveis com características internacionais, existe o “Programa Brasil Rodando Limpo”, uma iniciativa da Abrerpi - Associação Brasileira de Empresas de Reciclagem de Pneus Inservíveis para viabilizar e dinamizar a coleta e reciclagem de pneus em todo o país e que faz a coleta de pneus importados, atuando no gerenciamento da logística reversa de pneus exigida pela legislação ambiental brasileira (Resolução CONAMA nº 416/2009)

Nesse sistema, de forma geral, o funcionamento ocorre em etapas. Inicialmente, o centro automotivo cadastrado informa, por meio da plataforma da Abrerpi, que possui pneus inservíveis disponíveis. A partir dessa informação, um coletor da região se responsabiliza por retirar esse material e levá-lo até uma cooperativa de reciclagem. (Abrerpi, 2023). A vantagem para as prefeituras neste novo modelo de logística reversa de pneumáticos é que deixam de arcar com as despesas de um ponto público para armazenamento de pneus inservíveis e passam a usar o espaço das cooperativas de catadores. (Abrerpi, 2023)

Com base nos resultados obtidos, propõem-se as seguintes recomendações práticas para o município de Itapeva:

- Formalizar contato com a Abrerpi para a destinação regular de pneus inservíveis e EPS via coprocessamento, com periodicidade definida.

- Adequar o espaço de armazenamento de pneus com cobertura, ventilação, impermeabilização e sistema de controle de inventário, em conformidade com os requisitos da Resolução CONAMA nº 416/2009;
- Articular, junto a municípios vizinhos, a formação de consórcio intermunicipal para viabilizar economias de escala nas soluções de maior custo, como a granulação de pneus.

5.2 Isopor

O isopor, tecnicamente denominado poliestireno expandido (EPS), é um material amplamente utilizado em embalagens de alimentos, eletrodomésticos e produtos diversos, sendo gerado majoritariamente a partir do consumo humano em mercados, comércios e residências. Apesar de suas vantagens logísticas, como leveza e capacidade de proteção térmica e mecânica, o EPS apresenta sérios desafios ambientais e operacionais no pós-consumo.

Devido à sua baixa densidade aparente, grandes volumes de isopor correspondem a pequenas massas, o que dificulta significativamente sua coleta, transporte e comercialização. Segundo a Associação Brasileira da Indústria do Plástico (Abiplast 2021), o EPS é um dos resíduos plásticos com menor valor econômico por unidade de volume, exigindo grandes quantidades para que sua reciclagem se torne viável financeiramente. Como consequência, o material tende a se acumular nos pontos de triagem e cooperativas, permanecendo estocado por longos períodos à espera de compradores.

Além das limitações econômicas, a ausência de alternativas locais de reaproveitamento e a baixa atratividade comercial dificultam a destinação adequada do isopor, fazendo com que parte desse resíduo seja encaminhada para aterros sanitários ou permaneça armazenada de forma provisória. Embora seja tecnicamente reciclável, o EPS enfrenta entraves logísticos e de mercado que limitam sua reinserção no ciclo produtivo, evidenciando a necessidade de soluções baseadas nos princípios da economia circular e no fortalecimento da cadeia de reciclagem (IPEA, 2020; Ministério do Meio Ambiente, 2022).

As embalagens plásticas representam um dos principais exemplos do modelo de economia linear, baseado na extração de recursos fósseis, uso por curto período e descarte após o consumo. Esse padrão está associado a baixas taxas de

reciclagem e a problemas recorrentes de gestão de resíduos, contribuindo para a poluição ambiental. Mesmo com o aumento das discussões sobre sustentabilidade, o volume de resíduos plásticos continua crescendo, o que reforça a necessidade de soluções alinhadas à economia circular (Ellen MacArthur Foundation, 2016).

A gestão do EPS em Itapeva apresenta um perfil distinto em relação aos pneus: enquanto estes acumulam-se no depósito municipal sem destinação regular, o EPS é gerido pela Coopersel com alguma estrutura de triagem e prensagem. No entanto, a cadeia ainda apresenta fragilidades relevantes que comprometem sua eficiência e sustentabilidade econômica.

O principal problema identificado é a descontinuidade da comercialização. O EPS prensado permanece estocado na cooperativa à espera de compradores, o que evidencia a limitação do mercado secundário para esse material, mesmo após compactação. Esse fenômeno é estrutural: conforme apontam Schyns e Shaver (2021), a degradação das propriedades do poliestireno a cada ciclo de reprocessamento mecânico reduz a atratividade do material reciclado frente ao virgem em determinadas aplicações. Esse fator, somado ao baixo valor de mercado, cria um ciclo de baixa atratividade que dificulta a consolidação de uma cadeia formal de reciclagem do EPS.

A ausência de conhecimento pleno sobre os Pontos de Entrega Voluntária (PEVs) disponíveis no município constitui outro fator limitante. Segundo dados coletados na visita, parte da administração pública e da população desconhece a existência e função dos dois PEVs instalados em Itapeva, o que compromete a taxa de separação na fonte e, conseqüentemente, a qualidade e volume do material disponível para reciclagem. O Decreto Federal nº 12.688/2025, ao prever a expansão dos PEVs para todos os municípios até 2029, representa um avanço regulatório importante, mas depende de esforços locais de comunicação e educação ambiental para produzir efeitos concretos.

5.5 Custos associados às formas de reaproveitamento dos materiais

5.5.1 Considerações sobre a Análise de Custos

A avaliação dos custos associados ao reaproveitamento de pneus inservíveis e EPS em municípios de pequena a médio porte apresenta desafios metodológicos relevantes, uma vez que os dados disponíveis na literatura são, em geral, referenciados em contextos industriais de grande escala ou em cenários nacionais agregados, sem desagregação por porte municipal ou especificidade regional. Dessa forma, a análise proposta combina estimativas quantitativas extraídas da literatura acadêmica com uma avaliação comparativa, buscando identificar a relação custo-benefício de cada alternativa no contexto de Itapeva - SP.

Cabe ressaltar que os custos envolvidos em cadeias de reciclagem abrangem três dimensões principais: (i) custos logísticos, relacionados à coleta, transporte e armazenamento; (ii) custos de processamento, vinculados às tecnologias e infraestruturas necessárias; e (iii) custos de oportunidade, associados ausência de destinação adequada e à consequente geração de passivos ambientais (Manzan, 2021)

Por se tratarem de estimativas utilizadas em estudos da área, esses custos servem como referência para a análise proposta, permitindo uma avaliação consistente mesmo na ausência de dados coletados diretamente em campo.

5.5.2 Custos Associados aos Pneus

Considerando as dimensões territoriais do Brasil, o retorno desses materiais até os locais de reciclagem envolve custos elevados, o que representa um dos principais desafios da logística reversa (Soler, 2019)

O coprocessamento de pneus inservíveis, entre as alternativas avaliadas, se destaca como uma opção potencialmente viável para o município de Itapeva, uma vez que não exige a implantação de infraestrutura própria, e contribui para a redução do acúmulo de resíduos no meio ambiente. No entanto, sua adoção está diretamente condicionada à disponibilidade de unidades industriais com fornos de clínquer nas proximidades ou a parcerias com empresas ou órgãos responsáveis por coletar e transportar o resíduo acumulado até o destino final.

A reciclagem mecânica via granulação, por sua vez, envolve investimentos substancialmente maiores. A instalação de uma planta de granulação de médio porte requer equipamentos como trituradores, separadores magnéticos e

peneiras vibratórias, com custos de implantação que podem superar R\$500 mil, conforme referências de preço no mercado nacional para equipamentos.

A inviabilidade econômica para implantação pelo município reforça a necessidade de articulação com empresas do setor privado ou arranjos regionais de consórcio municipal.

A laminação, por sua menor complexidade operacional, apresenta custos de implantação inferiores aos da granulação, sendo considerada tecnologia de baixo custo relativo. No entanto, os produtos obtidos, que são mantas e lâminas de borracha, possuem mercado regional limitado, o que pode restringir a receita gerada e comprometer a sustentabilidade econômica da operação no longo prazo. (Nerasti; Martins, 2017).

Com base nos aspectos técnicos, logísticos e econômicos discutidos, a Tabela 7 apresenta uma esquematização comparativa dos principais métodos de reaproveitamento de pneus analisados neste estudo. Foram considerados critérios relacionados ao custo estimado, logística necessária, infraestrutura requerida, vantagens e limitações de aplicabilidade de cada processo, permitindo uma visualização sintética das potencialidades e desafios associados ao coprocessamento, à granulação e à laminação no contexto do município de Itapeva-SP.

Tabela 7. Esquematização sobre o reaproveitamento de pneus

Processo	Custo Estimado	Logística	Infraestrutura Requerida	Vantagens	Limitações / Aplicabilidade
Coprocessamento	Baixo	Realização da coleta, transporte até cimenteiras para queima em forno	Nenhuma própria; depende de cimenteira licenciada	Destruição total do resíduo; aproveitamento energético; aço incorporado ao clínquer; sem geração de novos passivos	Técnica de maior viabilidade; Dependência de parceria com cimenteira ou logística de transporte. Sua viabilidade depende principalmente de parcerias.
Granulação	Alto (devido infraestrutura)	Realização da coleta, transporte, separação e granulação	Trituradores, separadores magnéticos, peneiras — exige planta industrial	Reaproveitamento material da borracha; diversas aplicações (asfalto-borracha, pisos, tapetes)	Baixa viabilidade local sem parceria regional; alto investimento inicial.
Laminação	Baixo/Médio	Realização da coleta, transporte, corte e separação, laminação transformação em artefatos	Máquinas de corte, separadores e laminadores — menor escala	Simplicidade operacional; menor custo; fácil implantação em pequena escala	Pouco viável em Itapeva, processo comumente utilizado para pneus diagonais.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Lagarinhos e Espinosa (2008); Lagarinhos, Espinosa e Tenório (2016); IBAMA (2024); Bernucci et al. (2010); Nerasti e Martins (2017); Rodrigues e Bezerra (2021).

5.5.3 Custos associados ao EPS

No caso da Coopersel em Itapeva, a etapa de prensagem já é realizada, o que representa um avanço operacional relevante. No entanto, o valor de comercialização do EPS prensado, em torno de R\$0,30 por unidade de referência adotada pela cooperativa mantém a atividade economicamente complicada, sendo viabilizada apenas pela comercialização conjunta com materiais de maior valor, como o PET. Essa realidade é consistente com o que aponta o Instituto Lixo Zero Brasil (Projeto Colabora, 2019): um caminhão cheio de EPS sem tratamento pode render apenas R\$200,00, valor insuficiente para cobrir os custos operacionais básicos do transporte.

A reciclagem química do EPS, embora tecnicamente superior em termos de qualidade do material recuperado, apresenta custos de implantação elevados, associados à necessidade de reatores, sistemas de destilação e solventes específicos. O uso de solventes convencionais como tolueno e xileno, além de apresentar riscos ambientais, eleva os custos de controle operacional (Silva, 2021). Solventes alternativos como o d-limoneno, mais seguros e de origem renovável, ainda estão em fase de escalabilidade industrial, o que limita sua aplicação prática em municípios como Itapeva no curto prazo (Sousa, 2025).

Com base nos aspectos discutidos, a Tabela 8 sintetiza as principais tecnologias de reaproveitamento do EPS (isopor), destacando suas exigências operacionais, custos estimados, vantagens e limitações de aplicação. A comparação permite visualizar de forma integrada quais alternativas apresentam maior potencial de viabilidade para o contexto do município de Itapeva-SP, considerando as condições logísticas, estruturais e econômicas identificadas ao longo da análise.

Tabela 8. Comparativo de tecnologias de reaproveitamento do EPS

Processo	Custo Estimado	Infraestrutura Requerida	Vantagens	Limitações / Aplicabilidade
Reciclagem Mecânica	Médio	Prensa/desgaseificado, extrusora, moinho; infraestrutura de cooperativa ou empresa	Reinserção como matéria-prima; reduz volume para transporte; alinhada à PNRS	Viabilidade alta, a Coopersel já prensa o EPS. Baixo valor comercial

Reciclagem Química (dissolução em solvente)	Alto	Reatores, solventes controlados (ex.: d-limoneno), destilação	Material obtido equivale ao virgem; tolera contaminação; fecha ciclo do poliestireno	Tecnologia em desenvolvimento no Brasil; inviável em escala municipal no curto prazo.
Incorporação em Concreto Leve	Baixo a Médio	Parceria com construtoras ou laboratórios; sem equipamento especializado	Valorização do EPS em obras civis; melhora isolamento térmico e acústico; reduz aterramento	Alternativa viável para articulação com setor de construção civil de Itapeva e região. Não necessita infraestrutura
Coprocessamento (valorização energética)	Baixo (aproveitamento via cimenteira)	Sem infraestrutura própria necessária; custo com transporte	Alto poder calorífico; destruição térmica completa; resíduo incorporado ao cimento; sem geração de cinzas externas	Mesma parceria indicada para pneus pode absorver o EPS. Solução integrada com menor custo logístico.

Fonte: elaborado pelos autores com base em Strecker, Silva e Panzera (2014); Silva (2021); Sousa (2025); ABCP (2022); AECWeb (2021); Proecologic/Grupo Santa Luzia (2022).

6 Conclusão

Em relação aos pneus inservíveis, o diagnóstico evidenciou fragilidades estruturais no sistema de armazenamento e dependência excessiva de um único operador de destinação, com retirada irregular e critérios restritivos de aceitação.

O coprocessamento, entre as alternativas analisadas, pode representar uma alternativa mais viável para o município de Itapeva, visto que não demanda infraestrutura própria e reduz os resíduos ambientais acumulados. Porém, está condicionada à existência de fornos rotativos de clínquer nas proximidades do município, o que cria dependência estrutural e problemas logísticos, como transporte dos pneus. Sua viabilidade aumenta consideravelmente em cenários onde é realizado parcerias para diminuição de custos envolvendo transporte e frete.

A laminação e a granulação aparecem como alternativas complementares, com viabilidade condicionada à escala de operação e à articulação com agentes especializados.

Em relação ao EPS, o estudo identificou que a Coopersel já realiza etapas relevantes da cadeia de reciclagem, triagem e prensagem, mas enfrenta limitações

de mercado expressivas, com baixo valor de comercialização e dependência da venda conjunta com materiais de maior valor. A ausência de conhecimento dos PEVs pela população e pelo poder público local compromete adicionalmente a eficiência do sistema, pois sem que a prefeitura reconheça e integre os PEVs ao sistema municipal de gestão de resíduos, eles funcionam de forma isolada, sem apoio institucional, sem divulgação oficial e sem integração com a coleta seletiva existente. Isso mantém a economia circular desses resíduos dependente de esforços pontuais e voluntários, sem regularidade.

O coprocessamento apresenta-se, também para o EPS, como alternativa imediata de menor custo e maior segurança ambiental, aproveitando a mesma parceria indicada para os pneus. A incorporação do EPS em concreto leve representa alternativa de médio prazo com potencial de valorização local, enquanto a reciclagem química permanece como perspectiva de longo prazo, embora condicionada ao amadurecimento tecnológico e à redução dos custos dos solventes alternativos.

A análise de custos reforçou que a inviabilidade econômica percebida em algumas alternativas são uma questão de escala e de articulação institucional, e não de impossibilidade técnica. O custo da inação representado pelo passivo ambiental acumulado, pelo risco sanitário e pela pressão sobre os aterros supera, no médio e longo prazo, o custo de qualquer das alternativas analisadas.

Os resultados deste trabalho reforçam que a gestão de resíduos sólidos de difícil reaproveitamento, como pneus inservíveis e EPS, exige uma abordagem que combine diagnóstico local preciso, escolha tecnológica adequada à escala e às condições estruturais disponíveis, e articulação entre os diferentes atores da cadeia reversa: poder público, setor privado, cooperativas e população.

Recomenda-se que estudos futuros aprofundem a análise de ciclo de vida (ACV) das alternativas identificadas, com quantificação das externalidades ambientais positivas e negativas de cada rota de destinação, e que pesquisas aplicadas avaliem, em escala piloto, a incorporação do EPS pós-consumo de Itapeva em matrizes cimentícias, gerando dados técnicos locais que possam subsidiar políticas públicas municipais de gestão de resíduos.

Recomenda-se também que o município elabore um cadastro atualizado de empresas recicladoras e destinadoras licenciadas, tanto para pneus inservíveis

quanto para EPS, considerando um raio logístico economicamente viável a partir de Itapeva.

A viabilização da cadeia do EPS em Itapeva requer a estruturação de um circuito local de coleta seletiva porta a porta, em parceria entre a Coperseel, o poder público municipal e os grandes geradores comerciais — como supermercados, distribuidoras e indústrias, com rotas definidas e remuneração fixa por quantidade coletada, paga pelo município ou pelos próprios geradores, nos termos da responsabilidade compartilhada prevista na Lei Federal nº 12.305/2010 (Política Nacional de Resíduos Sólidos).

Paralelamente, o escoamento do EPS já compactado pela cooperativa pode ser viabilizado por meio da articulação com empresas especializadas em logística reversa de EPS industrial que atuam na região. A Isopor Legal, empresa sediada em São Paulo, declara atender municípios do interior paulista, incluindo Itapetininga, cidade distante aproximadamente 30 km de Itapeva, atuando na coleta de EPS industrial com foco em logística reversa, economia circular e destinação ambientalmente correta do material

Nesse modelo, a Coperseel deixaria de ser apenas receptora de resíduos e passaria a atuar como fornecedora de matéria-prima reciclada já processada, uma vez que a etapa de triagem e prensagem já é realizada localmente.

7. REFERÊNCIAS

- ABDALLA, Fernando Antônio; FREIRE SAMPAIO, Antônio Carlos. Os novos princípios e conceitos inovadores da Economia Circular. **Entorno Geográfico**, [S. l.], n. 15, p. 82-102, 2018. DOI: <https://doi.org/10.25100/eg.v0i15.6712>. Disponível em: <https://entornogeografico.univalle.edu.co/index.php/entornogeografico/article/view/6712>. Acesso em: 7 jun. 2026.
- ABRAPEX – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO POLIESTIRENO EXPANDIDO. **O que é o EPS (Isopor)**. São Paulo: ABRAPEX, [s. d.]. Disponível em: <https://abrapex.com.br>. Acesso em: 17 maio 2026.
- ABRERPI – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECICLAGEM DE PNEUS INSERVÍVEIS. **Brasil Rodando Limpo**. [S. l.]: ABRERPI, [s. d.]. Disponível em: <https://www.abrerpi.org.br/storage/folder-brasil-rodando-limpo.pdf>. Acesso em: 3 jun. 2026.
- ABRERPI – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECICLAGEM DE PNEUS INSERVÍVEIS. **Iniciativas**. [S. l.]: ABRERPI, [s. d.]. Disponível em: <https://www.abrerpi.org.br/iniciativas>. Acesso em: 3 jun. 2026.
- AECWEB. **Reciclagem do EPS por gaseificação a plasma gera energia**. São Paulo: AECweb, 2021. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/reciclagem-do-eps-por-gaseificacao-a-plasma-gera-energia/21263>. Acesso em: 7 jun. 2026.
- ALMEIDA, Raquel Gomes de. Estudo da geração de resíduos sólidos domiciliares urbanos do município de Caçador SC, a partir da caracterização física e composição gravimétrica. **IGNIS – Periódico Científico de Arquitetura e Urbanismo, Engenharias e Tecnologia de Informação**, Caçador, v. 1, n. 1, p. 51-70, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO (ABIPLAST). **Perfil 2021**: indústria brasileira de transformação e reciclagem de material plástico. São Paulo: ABIPLAST, 2021. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br>. Acesso em: jun. 2026.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Panorama do Coprocessamento – Brasil 2025**: ano base 2024. São Paulo: ABCP, 2025. Disponível em: https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2025/12/Panorama_Coprocessamento_2025_Ano_Base_2024.pdf. Acesso em: 2 jun. 2026.
- BARNHART, R. R. Rubber compounding. *In*: KIRK-OTHMER. **Concise Encyclopedia of Chemical Technology**. [S. l.]: John Wiley & Sons, 1985.
- BARROS, R. T. V.; SILVEIRA, Á. V. F. Uso de indicadores de sustentabilidade para avaliação da gestão de resíduos sólidos urbanos na Região Metropolitana de Belo Horizonte. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, p. 411-423, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1413-41522019177499>.
- BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS; ABEDA, 2010.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução n. 258, de 26 de agosto de 1999. Dispõe sobre a coleta e destinação final de pneus inservíveis. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 2 dez. 1999. Disponível em: <https://www.normasbrasil.com.br/norma/?id=96050>. Acesso em: 2 jun. 2026.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução n. 416, de 30 de setembro de 2009. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 1 out. 2009. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=111056>. Acesso em: 2 jun. 2026.

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. Brasília, DF: Presidência da República, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 2 jun. 2026.

BRUNETTO, A.; PASSOS, M. G. Logística reversa de pneus inservíveis: estudo de caso do município de Xanxerê – SC. **Latin American Journal of Business Management**, [S. l.], v. 6, n. 3, p. 20-24, 2016.

CALAZANS, Lorena Bezerra Barbosa; SILVA, Glessia. Inovação de processo: uma análise em empresas com práticas sustentáveis. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, São Paulo, v. 5, n. 2, p. 115-129, 2016.

CAMPOS, Roger Francisco Ferreira de; BORGA, Tiago. Análise da geração de resíduos nos laboratórios de uma universidade do município de Caçador/SC, com a perspectiva da implantação de um plano de gestão de resíduos de serviços da saúde (PGRSS). **Espacios**, Caracas, v. 38, p. 9, 2017.

CAMPOS, Roger Francisco Ferreira de; LIMA, Claudemir de. Sustentabilidade através de remanejo de resíduos com prática de gestão ambiental implantado no supermercado cereal. **IGNIS – Periódico Científico de Arquitetura e Urbanismo, Engenharias e Tecnologia de Informação**, Caçador, v. 3, n. 1, p. 25-44, 2014. DOI: <https://doi.org/10.29327/223085.3.1-2>.

CAMPOS, Roger Francisco Ferreira; ORCHULHAK, Ezele Eduardo. Análise qualitativa e quantitativa de resíduos da construção civil (RCC) gerados na fase de acabamento de um edifício residencial do município de Caçador, Santa Catarina, Brasil. **Meio Ambiente (Brasil)**, [S. l.], v. 7, n. 3, p. 15-21, 2025.

CHAUKURA, N. *et al.* Potential uses and value added products derived from waste polystyrene in developing countries: a review. **Resources, Conservation & Recycling**, [S. l.], v. 107, p. 157-165, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.031>.

CONTINENTAL. **Componentes e estrutura do pneu**. Hannover: Continental, [s. d.]. Disponível em: <https://www.continental-pneus.com.br>. Acesso em: 17 maio 2026.

COSENZA, J. P.; ANDRADE, E. M.; ASSUNÇÃO, G. M. A circular economy as an alternative for Brazil's sustainable growth: analysis of the National Solid Waste Policy. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade (GeAS)**, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 1-28, e16147, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5585/GEAS.V9I1.16147>.

CRUZ, T. T. **Uso da avaliação do ciclo de vida para a determinação da redução de emissões de gases de efeito estufa e do consumo de energia associados à reciclagem de EPS**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

DA SILVA, Joelma Veras *et al.* Meio ambiente, sustentabilidade e responsabilidade compartilhada: a gestão de resíduos sólidos à luz da Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Revista DCS**, [S. l.], v. 23, n. 87, p. e4765, 2026.

DE BEER, J. *et al.* **Market opportunities for use of alternative fuels in cement plants across the EU**: assessment of drivers and barriers for increased fossil fuel substitution in cement plants. Utrecht: Ecofys, 2016. Elaborado para a CEMBUREAU – The European Cement Association. Disponível em: https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2019/09/Ecofys_Report_Market_Opportunities_Coprocessing_20160501.pdf. Acesso em: 2 jun. 2026.

DE FREITAS, Gabriel Sousa. Avaliar por meio da literatura os avanços da consciência ambiental referente ao resíduo de poliestireno expandido (EPS). **Revista Geociências – UNG-Ser**, Guarulhos, v. 20, n. 1, p. 5-11, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33947/1981-741X-v20n1-4690>.

EPSOLE. **Impactos dos microplásticos de EPS no meio ambiente**. [S. l.]: Epsole, 2025. Disponível em: <https://www.epsole.com.br>. Acesso em: 17 maio 2026.

EPSOLE. **São EPS (Poliestireno Expandido) grânulos tóxicos?** Hangzhou: Epsole, 28 mar. 2024. Disponível em: <https://epsole.com/pt/are-eps-beads-toxic>. Acesso em: abr. 2026.

FERREIRA, Ana Matilde Roriz Bacelar. **Avaliação dos impactes ambientais associados ao processo de produção do granulado de borracha a partir de pneus em fim de vida**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Universidade do Porto, Porto, 2019.

FREITAS, S. S.; NOBREGA, C. C. Os benefícios do co-processamento de pneus inservíveis para a indústria cimenteira. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 19, n. 3, p. 293-300, 2014. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S141341522014000300293. Acesso em: 21 abr. 2026.

GAMEIRO, A. H. *et al.* **Logística ambiental de resíduos sólidos**. São Paulo: Atlas, 2011.

GONÇALVES, T. M.; BARROSO, A. F. F. A economia circular como alternativa à economia linear. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DE SERGIPE, 11., 2019, São Cristóvão. **Anais [...]**. São Cristóvão: Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Sergipe, 2019. p. 265-272. Disponível em: <https://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/12561>. Acesso em: 7 jun. 2026.

GROTE, Zilmara V.; SILVEIRA, José L. Análise energética e exergética de um processo de reciclagem de poliestireno expandido (isopor). **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, São Paulo, v. 3, n. 3, 2010.

GRUPO GREENER. **Laminados Greener**: sustentabilidade e redução do desperdício. São Paulo: Grupo Greener, 2024. Disponível em: <https://greenerbrasil.com.br/laminado-de-pneu/>. Acesso em: jun. 2026.

GUEDES, Fabiano Cesar Vieira. **Índice de produtividade verde em uma indústria química de poliestireno expandido (IPV-EPS)**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

GULARTE, Luiz Carlos Pais *et al.* Estudo de viabilidade econômica da implantação de uma usina de reciclagem de resíduos da construção civil no município de Pato Branco (PR), utilizando a metodologia multi-índice ampliada. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 5, p. 985-992, 2017.

HOFFMAN, W. **Rubber Technology Handbook**. Nova York: Hanser, 1989.

INDÚSTRIA SANTA LUZIA. **O passo a passo da reciclagem do isopor**. Blog Indústria e Comércio de Molduras Santa Luzia, Içara, 22 fev. 2018. Disponível em: <https://www.industriasantaluzia.com.br/blog/o-passo-a-passo-da-reciclagem-do-isopor/>. Acesso em: jan. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Relatório de pneumáticos 2024**. Brasília, DF: IBAMA, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/residuos/arquivos/relatorio-pneumaticos/20250410_Anexo_23022971_Relatorio_Pneumatico_2024.pdf. Acesso em: 2 jun. 2026.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Reciclagem e economia solidária**: análise das dimensões estruturais dos empreendimentos coletivos de catadores no Brasil. Brasília, DF: IPEA, 2020.

ISOPOR LEGAL. **Reciclagem de EPS industrial**: coleta de refugo de isopor. [S. l.]: Isopor Legal, [s. d.]. Disponível em: <https://isopor.legal/reciclagem/>. Acesso em: 7 jun. 2026.

JUNTUNEN, J. *et al.* Circular economy through waste reverse logistics under extended producer responsibility. **Sustainable Production and Consumption**, [S. l.], v. 39, p. 12-25, 2023.

KAZA, S. *et al.* **What a Waste 2.0**: a global snapshot of solid waste management to 2050. Washington, DC: World Bank, 2018. (Urban Development Series).

KIRCHHERR, Julian; REIKE, Denise; HEKKERT, Marko. Conceptualizing the circular economy: an analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation & Recycling**, [S. l.], v. 127, p. 221-232, 2017.

KNAUF ISOPOR. **EPS Isopor**: tudo o que você precisa saber. São Paulo: Knauf Isopor, [s. d.]. Disponível em: <https://www.mundoisopor.com.br/knauf/eps-isopor-tudo-o-que-voce-precisa-saber>. Acesso em: 31 out. 2025.

LACERDA, M. Pneus que viram asfalto. **Superinteressante**, Porto Alegre, 2003. Disponível em: <http://super.abril.com.br/ecologia/pneus-viram-asfalto-443966.shtml>. Acesso em: jun. 2026.

LAGARINHOS, Carlos Alberto Ferreira. **Reciclagem de pneus**: análise do impacto da legislação ambiental através da logística reversa. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-09032012-140924/publico/Tese_Carlos_A_P_Lagarinhos.pdf. Acesso em: 7 jun. 2026.

LAGARINHOS, Carlos Alberto Ferreira; ESPINOSA, Denise Crocce Romano; TENÓRIO, Jorge Alberto Soares. A evolução do coprocessamento de pneus inservíveis no Brasil. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS (CBECiMat), 22., 2016, Natal. **Anais [...]**. Natal: CBECiMat, 2016.

LAMAS, Wellington de Queiroz; PALAU, José Carlos Ferrer; CAMARGO, Júlio César de. Waste materials co-processing in cement industry: ecological efficiency of waste reuse. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 19, p. 200-207, 2013.

LENÇÓIS PAULISTA. **Coleta seletiva promove geração de renda e preserva recursos naturais**. Prefeitura Municipal de Lençóis Paulista, Lençóis Paulista, 2018. Disponível em: <http://www2.lencoispaulista.sp.gov.br/v2/noticia/4572>. Acesso em: jun. 2026.

LE MOS, G. M. *et al.* **Impermeabilização utilizando borracha reciclada de pneus**. [S. l.: s. n.], 2025.

LIMA, Adriana Sampaio; CABRAL, Antonio Eduardo Bezerra. Caracterização e classificação dos resíduos de construção civil da cidade de Fortaleza (CE). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 2, p. 169-176, 2013.

MAIELLO, Antonella; BRITTO, Ana Lucia Nogueira de Paiva; VALLE, Tatiana Freitas. Implementação da política nacional de resíduos sólidos. **Revista de Administração Pública**, Rio de Janeiro, v. 52, p. 24-51, 2018.

MANZAN, Ludmila. **Reciclagem do poliestireno expandido com foco em sustentabilidade**: revisão dos processos de redução de volume e reciclagem. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2021.

MARK, J. E.; ERMAN, B.; EIRICH, F. R. **Science and Technology of Rubber**. 1. ed. Saint Louis: Elsevier Science, 2014. v. 1.

MARTINS, Joana D'arc Dias; RIBEIRO, Maria de Fátima; SILVA, Mireni Oliveira Costa. Reflexões sobre a economia circular e a logística reversa dos resíduos eletroeletrônicos: a concessão dos incentivos fiscais para cooperativas de reciclagem como eficiente instrumento de promoção do desenvolvimento sustentável. **Revista Brasileira de Políticas Públicas**, Brasília, v. 13, n. 3, 2023.

MICHELIN. **Fabricação e reciclagem de pneus**. [S. l.]: Michelin, [s. d.]. Disponível em: <https://www.michelin.com.br/auto/conselhos/informacoes-basicas-sobre-pneus/fabricacao-e-reciclagem-de-pneus>. Acesso em: jun. 2026.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Dengue, Zika e Chikungunya**: guia de vigilância em saúde. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2022. Disponível em: <https://www.saude.gov.br>. Acesso em: jun. 2026.

MUNDO ISOPOR. **Reciclagem mecânica**: como funciona e se aplica ao EPS Isopor®? Mundo Isopor, São Paulo, 7 mar. 2024. Disponível em:

<https://www.mundoisopor.com.br/sustentabilidade/reciclagem-mecanica>. Acesso em: jun. 2026.

NERASTI, A. V.; MARTINS, L. L. S. Reciclagem de pneumáticos: levantamento das tecnologias e legislações para a destinação final de pneus. **Anais do Brazilian Technology Symposium**, [S. l.], v. 1, p. 1-4, 2017.

RAMOS, L. S. N. **A logística reversa de pneus inservíveis**: o problema da localização dos pontos de coleta. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

ROGERS, D. S.; TIBBEN-LEMBKE, R. S. **Going backwards**: reverse logistics trends and practice. [S. l.]: University of Nevada; Reverse Logistics Executive Council, 1998.

SANTOS, Marília Gabriela dos. **Desafios para o fechamento de cadeias de suprimento de produtos de baixo valor agregado**: o caso das embalagens plásticas e de vidro. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

SANTOS, Tarcísio de Souza; SILVA, Thiago Pereira da; SILVA, André Luiz Ferreira da. Pavimentação de rodovias com a utilização de resíduos de pneus inservíveis. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, [S. l.], ano 2, ed. 1, v. 13, p. 212-241, 2017.

SCHMIDT, P. N. S. **A qualidade de placas de circuito impresso confeccionadas a partir de poliestireno reciclado**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

SHAMSUYEVA, M.; ENDRES, H. J. Plastics in the context of the circular economy and sustainable plastics recycling: comprehensive review on research development, standardization and market. **Composites Part C: Open Access**, [S. l.], v. 6, p. 100168, out. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100168>.