



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS**

CAMPUS PALMAS

CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL

ADRIANO ALMEIDA ANDRADE

**TRATAMENTO TÉRMICO DE PNEUS INSERVÍVEIS PARA O APROVEITAMENTO
DO ÓLEO PIROLÍTICO**

PALMAS

2022

ADRIANO ALMEIDA ANDRADE

**TRATAMENTO TÉRMICO DE PNEUS INSERVÍVEIS PARA O APROVEITAMENTO
DO ÓLEO PIROLÍTICO**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado como requisito parcial
para obtenção do título de Bacharel
no Curso Superior de Engenharia
Civil do Instituto Federal do
Tocantins, *Campus* Palmas.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo
Mendes Pedroza

PALMAS

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

A554t Andrade, Adriano Almeida
Tratamento térmico de pneus inservíveis para o aproveitamento do
óleo pirolítico / Adriano Almeida Andrade. – Palmas, TO, 2022.
48 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em
Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2022.

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

1. Pirólise de pneus inservíveis. 2. Óleo pirolítico. 3.
Hidrocarbonetos. I. Pedroza, Marcelo Mendes. II. Título.

CDD 624

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins
de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a).**

FOLHA DE APROVAÇÃO

ADRIANO ALMEIDA ANDRADE

TRATAMENTO TÉRMICO DE PNEUS INSERVÍVEIS PARA O APROVEITAMENTO DO ÓLEO PIROLÍTICO

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Coordenação do
curso de Engenharia Civil Instituto
Federal do Tocantins - *Campus*
Palmas, como exigência à obtenção
do grau em Engenheiro Civil.

Aprovado em: 01/07/2022

BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza
Orientador - IFTO



Prof. Dra. Elaine da Cunha Silva Paz
Examinador - IFTO



Prof. Msc. Michelle Ludmila Guedes dos Santos
Examinador – IFTO

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, em forma de agradecimento pela vida, bem como à minha mãe Nizete, por toda amor e cuidado desde sempre.

Dedico também aos meus irmãos, Aleandro e Ayne, por serem pessoas maravilhosas na minha vida.

Dedico especialmente à outra metade de mim, a quem eu intrinsecamente amo, Rosana, por todo apoio e companheirismo até aqui.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à minha família por todo o apoio ao longo deste jornada, bem como à minha namorada pela paciência, companeirismo e dedicação. Foi uma jornada árdua, mas conseguimos, obtivemos vitória.

Gostaria de agradecer aos amigos e também alunos que fiz durante o curso e compartilhei da luta necessária para esta conquista. Foram muitos momentos aprendendo juntos e nos ajudando. Fomos um time e tanto.

Gostaria de agradecer aos professores por todo o conhecimento passado. Foram lições didáticas e de vida que aprendi. Verdadeiros mestres.

Gostaria de agradecer ao professor, amigo e orientador, o Dr. Marcelo Mendes Pedroza, por sua inspiração ao conhecimento e evolução, pela ajuda em cada etapa deste trabalho e pelo grande exemplo de como ser um profissional de excelência, sem o qual este trabalho não seria inconcebível. Seu amor pelo o que faz contagia e inspira a todos os seus alunos.

A todos vocês, minha eterna gratidão.

RESUMO

ANDRADE, Adriano Almeida. **Tratamento Térmico De Pneus Inservíveis Para O Aproveitamento Do Óleo Pirolítico**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2022.

Um dos principais resíduos gerados por veículos são os pneus ao final da vida útil, conhecidos como pneus inservíveis. Tais pneus representam uma problemática real para o gerenciamento de resíduos sólidos urbanos (RSU), para a conservação ambiental e para a manutenção sanitária. Este trabalho tem como objetivo efetuar o tratamento térmico da borracha residual de pneus inservíveis (BRPI) visando obtenção de óleo pirolítico para uso industrial. O pneu inservível necessário foi coletado em borracharia em Palmas-TO, o qual aguardava pelo recolhimento pela empresa de reciclagem. O resíduo foi caracterizado através das seguintes análises: teor umidade, material volátil, cinzas e carbono fixo. A pirólise do resíduo foi realizada em reator de leito fixo empregando vapor de água como gás de arraste. O óleo pirolítico obtido no processo foi coletado após sistema de condensação acoplado ao reator termoquímico, sendo em seguida pesado para o cálculo de rendimento e armazenado em frasco apropriado. O óleo pirolítico foi caracterizado através das seguintes técnicas analíticas: pH, teste de solubilidade e cromatografia gasosa. Durante a análise imediata BRPI in natura foram obtidos os seguintes resultados: teor de umidade (0,9 %), material volátil (62,1 %), teor de cinzas (11,3 %) e carbono fixo (25,7 %). Nos ensaios de pirólise foram obtidos os seguintes rendimentos: (a) óleo pirolítico = 36,6 % e (b) carvão = 45,9 %. O pH do combustível líquido obtido durante a pirólise foi de 4,3 e se apresentou totalmente solúvel em acetona, hexano e diclorometano, caracterizando-se como substância apolar. Na análise cromatográfica do óleo de pirólise foi detectada a presença do composto 4-Vinilciclohexeno (VCH) que é um hidrocarboneto aromático muito empregado na indústria química.

Palavras-chave: pneu, pirólise, óleo, pirolítico, borracha, hidrocarboneto, tratamento.

ABSTRACT

ANDRADE, Adriano Almeida. **Heat Treatment of Waste Tires For the Use of Pyrolytic Oil**. 2021. Course Conclusion Paper - Bachelor of Civil Engineering - Federal Institute of Education, Science and Technology of Tocantins. Palmas, 2022.

One of the main wastes generated by vehicles is tires at the end of their useful life, known as waste tires. Such tires represent a real problem for the management of urban solid waste (USW), for environmental conservation and for sanitary maintenance. This work aims to carry out the thermal treatment of waste tire rubber (WTR) in order to obtain bio-oil for industrial applications. The necessary waste tire was collected at a tire repair shop in Palmas-TO, which was awaiting collection by the recycling company. The residue was characterized through the following analyses: moisture content, volatile material, ash and fixed carbon. The pyrolysis of the residue was carried out in a fixed bed reactor using water vapor as carrier gas. The bio-oil obtained in the process was collected after a condensation system coupled to the thermochemical reactor, and then weighed to calculate the yield and stored in an appropriate bottle. The bio-oil was characterized through the following analytical techniques: pH, solubility test and gas chromatography. During the immediate analysis of WTR in natura, the following results were obtained: moisture content (0.9%), volatile material (62.1%), ash content (11.3%) and fixed carbon (25.7%) . In the pyrolysis tests, the following yields were obtained: (a) pyrolytic oil = 36.6% and (b) charcoal = 45.9%. The pH of the liquid fuel obtained during the pyrolysis was 4.3 and it was completely soluble in acetone, hexane and dichloromethane, characterizing it as a nonpolar substance. In the chromatographic analysis of the pyrolysis oil, the presence of the compound 4-Vinylcyclohexene (VCH) was detected, which is an aromatic hydrocarbon widely used in the chemical industry.

Keywords: tire, pyrolysis, oil, rubber, hydrocarbon, processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura molecular da borracha vulcanizada	17
Figura 2 - Esquema de etapas da pirólise para pneus	22
Figura 3 - Etapas da pesquisa.....	23
Figura 4 - Local da coleta do pneu	24
Figura 5 - Pneu escolhido para análise	24
Figura 6 - Ferramenta de corte do pneu inservível.....	25
Figura 7 - Tiras de pneu coletadas.....	25
Figura 8 - Reator de leito fixo	28
Figura 9 - Pesagem da amostra para pirólise.....	28
Figura 10 - Análise do pH do bio-óleo	29
Figura 11 - Solventes utilizados no teste de solubilidade	29
Figura 12 - Histórico de toneladas de pneus inservíveis recolhidas por unidade federativa entre 2010 e 2019.....	31
Figura 13 - Relação entre toneladas recolhidas e vendidas de pneus	32
Figura 14 - Gráfico de toneladas pneus vendidas e recolhidas no Brasil entre 2010 e 2019.	32
Figura 15 - Destinação das toneladas recolhidas de pneus inservíveis entre 2010 e 2019.	33
Figura 16 - Gráfico demonstrativo da destinação de toneladas de pneus inservíveis entre 2010 e 2019.	33
Figura 17 - Gráfico evolutivo da destinação das toneladas de pneus inservíveis recolhidos entre 2010 e 2019.	34
Figura 18 - Carvão obtido durante a pirólise de pneu em reator de leito fixo	36
Figura 19 - Cromatograma obtido na análise cromatográfica do bio-óleo obtido durante a pirólise de pneu.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variantes do processo de pirólise	21
Tabela 2 - Condições cromatográficas empregadas na análise do bio-óleo	30
Tabela 3 – Resultados da análise imediata da BRPI	35
Tabela 4 - Rendimentos dos produtos (bio-óleo e carvão) obtidos durante a pirólise de pneu	36
Tabela 5 - Teste de solubilidade do bio-óleo.....	37
Tabela 6 - Tempo de retenção dos compostos presentes no bio-óleo obtido durante a pirólise de pneu.....	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLA

CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
BRPI	Borracha Residual de Pneus Inservíveis
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
NBR	Norma Técnica Brasileira
ASTM	American Society for Testing and Materials
ANIP	Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos
NR	Borracha Natural
SR	Borracha Sintética
BR	Borracha Butílica
SBR	Borracha de Estireno Butadieno
EPA	Agência de Proteção Ambiental Americana
°C	Graus Celsius
cm	Centímetros
g	Grama
mL	Mililitro
mJ/Kg	Megajoules por quilograma
min	Minuto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Problema de pesquisa.....	14
1.2	Justificativa	15
1.3	Objetivos	16
1.3.1	Objetivo Geral	16
1.3.2	Objetivos Específicos.....	16
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1	Pneus	16
2.1.1	Definição	16
2.1.2	História do pneu	16
2.1.3	Influência na sociedade	17
2.1.4	Impactos ambientais	18
2.1.5	Destinações e aplicações	18
2.1.6	Composição	19
2.2	Pirólise	20
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	22
3.1	Contextualização da pesquisa científica	22
3.2	Coleta do resíduo e preparação da amostra	23
3.3	Caracterização do material bruto	25
3.3.1	Teor de umidade.....	26
3.3.2	Teor de cinzas	26
3.3.3	Material volátil	27
3.3.4	Teor de carbono fixo	27
3.4	Pirólise em reator de leito fixo.....	27
3.5	Análise do Óleo pirolítico.....	28
3.5.1	Determinação do pH	28
3.5.2	Teste de solubilidade	29
3.5.3	Análise cromatográfica	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
4.1	Quantitativo de resíduos de pneus	30
4.2	Resultados da caracterização do material bruto	34

4.3	Rendimentos dos produtos obtidos na pirólise de pneu	35
4.3.1	Resultado do teste de solubilidade	37
4.3.2	Resultado do teste de pH	37
4.3.3	Caracterização do óleo pirolítico obtido no processo de pirólise de pneu	37
5	CONCLUSÕES.....	42
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

1 INTRODUÇÃO

O despejo de resíduos sólidos da atividade humana é um problema ambiental crescente para a sociedade moderna, especialmente em países em desenvolvimento e isso é um problema improrrogável.

A atividade humana gera resíduos de difícil depuração para a natureza e altamente ofensiva para o meio ambiente e aos dela dependentes, incluindo o próprio homem nesse grupo de risco. A balança tende ao abuso dos recursos naturais e a má preservação destes, ao contrário de estar balanceada entre o uso sustentável e o bom gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos. Entretanto, seriam os resíduos algum tipo de sinal de progresso? Ou será que atualmente é sinal de involução?

De toda forma, tal discursão não foi iniciada nas últimas décadas. Causam estranheza os questionamentos acima, pois parecem retóricas complexas quando que já existem instrumentos que podem não trazer respostas completas, mas esclareceriam parte do impasse.

Na década de 70 a preocupação sobre a balança citada acima deixou governos em alerta de forma que em 1972, em Estocolmo, ocorreu o primeiro diálogo devido acerca da impossibilidade da produção desenfreada de bens consumíveis e manter o meio ambiente em segundo plano. 15 anos mais tarde, em 1987, foi publicado o Relatório Mundial Sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento. 5 anos depois, em 1992, ocorreu a conferência popularmente conhecida como Rio 92.

Esses eventos atraíram a atenção da população para a situação em que o meio ambiente se encontrava e que estava bem diante dos seus olhos, bem como pressionou os governos a sair da inércia consumista alheia às condições ambientais e articular de forma diplomática ou mesmo a pressionar empresas para acatar os novos ou reformulados planos e legislações ambientais.

A resolução 416/2009 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) é um exímio exemplo da boa postura do Estado em relação aos apelos conservacionistas. Em termos reduzidos, a resolução determina responsabilidades sobre a logística reversa para pneus inservíveis para fabricantes, distribuidores, e vendedores, bem como atribui a articulação dos consumidores e demais envolvidos nos serviços que envolvam pneus.

A resolução 416/2009 do CONAMA ainda determina que o descarte incorreto no meio ambiente e até mesmo em aterros sanitários esteja vedada desde sua publicação, uma vez que pneus têm um tempo estimado de depuração de 600 anos. Segundo o IBAMA, entre 2010 e 2019 foram coletadas, em média, 526 mil toneladas de pneus. Esse número equivale a cerca de 55 milhões de pneus inservíveis descartados. Os pneus descartados de maneira incorreta se tornam problema para o meio ambiente e para a sociedade, servindo como criadouros do mosquito *Aedes Aegypti*, transmissor da dengue, da zika e da chikungunya (Ferreira, 2016).

Além das aplicações artesanais e asfálticas para pneus inservíveis, têm-se o conhecimento do poder calorífico armazenado na borra residual de pneus inservíveis (BRPI) e da sua aplicação como fonte combustível para usinas e reatores.

O processo de pirólise surge como tecnologia adequada para a conversão do resíduo sólido em produtos de valor agregado, contribuindo para a geração de novas fontes de energia, bem como para geração de produtos químicos. Durante a degradação térmica de pneus inservíveis são gerados produtos como os derivados de petróleo e gás, todos com potencial e com valor calorífico suficiente para geração de energia, destacando produtos com elevada concentração de hidrocarbonetos aromáticos valiosos, como benzeno, tolueno etilbenzeno e xileno (BTEx), os quais são aplicados como matéria-prima na indústria petroquímica para a geração de produtos químicos (Ferreira, 2016).

Esse trabalho tem como objetivo efetuar o tratamento térmico de pneus inservíveis visando a obtenção de óleo pirolítico combustível para aplicações tanto na geração de energia como na indústria química.

1.1 Problema de pesquisa

A produção e consumo de produtos derivados do petróleo é danoso ao meio ambiente em toda a sua cadeia, ainda assim, a sociedade moderna se vê presa à necessidade desses bens que listam combustíveis para aviação e veículos automotores terrestres, gás de cozinha (GLP), lubrificantes industriais e pneus.

Pneus representam preocupação em escala global, pois a produção e descarte de pneus ocorre em ritmo maior do que o reaproveitamento dos pneus

inservíveis, resultando em grandes massas de pneus inservíveis acumulados sujeitos a incêndios e propiciando abrigo para pragas e vetores de doenças.

É possível observar uma tendência mundial quanto às políticas de reciclagem de pneus, bem como o surgimento de pesquisas sobre a pirólise dos pneus para obtenção de óleo pirolítico e de subprodutos energéticos como gases e combustíveis.

Enquanto a ciência não dispõe de soluções sustentáveis para substituição do pneu convencional, as soluções devem partir principalmente dos governos. Novas pesquisas e tecnologias a cerca da reciclagem de BRPI devem ser incentivadas a fim de otimizar os resultados de forma a tornar mais atrativo à indústria a utilização de fontes energéticas oriundas da reciclagem de pneus inservíveis.

1.2 Justificativa

A sociedade tem vivido um intenso processo de consumo de recursos naturais e energia e de geração de resíduos. A principal fonte de energia é o petróleo, um combustível fóssil, poluente e finito.

Conforme apontado por VELOSO (2010), o descarte indevido de pneus em rios e lagos contribui para o assoreamento e enchentes, pneus tem tempo indeterminado de degradação, pneus têm elevado risco de incêndio e contaminação do solo e lençóis freáticos, são criadouros e abrigos para doenças.

A pirólise de pneus se mostra opção viável para auxiliar o gerenciamento de resíduos sólidos urbanos, bem como aliviar a solicitação de combustíveis fósseis advinda da demanda energética nacional.

VIEIRA (p. 87, 2011) afirma que

“a pirólise tem muitas vantagens comparadas às outras alternativas. No processo pirolítico, são gerados produtos que podem ser usados, tais como óleo, gases e carvão, como fonte de combustíveis ou em outros usos relacionados à indústria petroquímica” (apud KARAYILDIRIM; YANIK; YUKSEL, 2006).

Assim como a tendência populacional é de crescimento, a tendência de consumo de bens e geração de resíduos sólidos seguem retas crescentes. Desenvolver pesquisas sobre pirólise e avançar cientificamente rumo a metodologias

mais eficazes pode por fim gerar resultados notórios nessa problemática mundial.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Empregar o processo de pirólise em pneus inservíveis para produção de óleo pirolítico visando sua aplicação industrial.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Quantificar os resíduos da indústria de pneumáticos;
- Caracterizar quimicamente os resíduos;
- Produzir óleo pirolítico por meio de pirólise de pneus em reator de leito fixo;
- Caracterizar o óleo pirolítico produzido no processo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Pneus

2.1.1 Definição

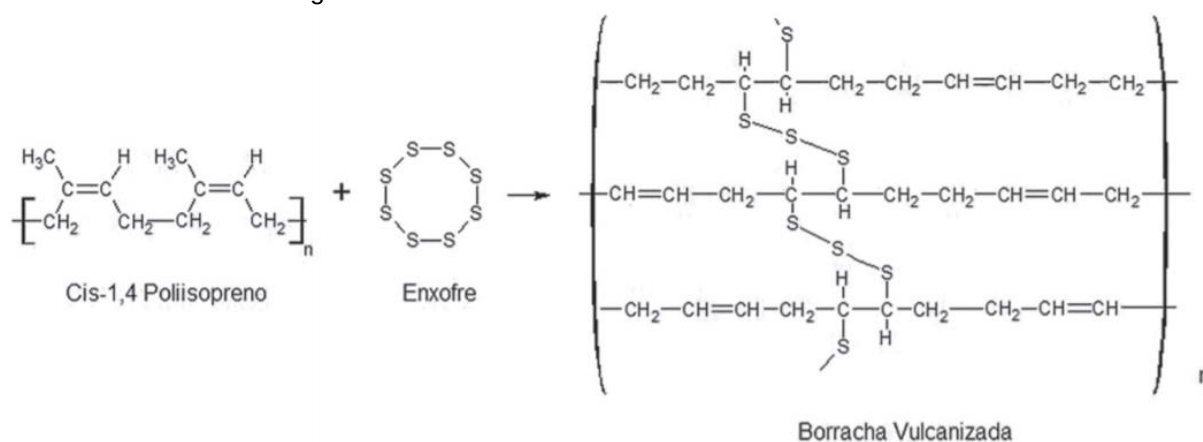
O pneu é uma complexa estrutura formada por diversos tipos de materiais, estrutura conhecida como compósito ou estrutura compósita. É definido pelo CONAMA, através da sua resolução nº 416/2009, como

Componente de um sistema de rodagem, constituído de elastômeros, produtos têxteis, aço e outros materiais que quando montado em uma roda de veículo e contendo fluido(s) sob pressão, transmite tração dada a sua aderência ao solo, sustenta elasticamente a carga do veículo e resiste à pressão provocada pela reação do solo (CONAMA – Resolução 416/2009).

2.1.2 História do pneu

Conforme relatado pela Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP), inicialmente, a borracha era grudenta e espessa, sem rigidez para obter forma definida, sendo aplicada para fins impermeabilizantes que não estivesse sujeito à altas temperaturas. Em 1830, após experimentos pelo pioneiro americano Charles Goodyear, ele concluiu acidentalmente que a borracha cozida com enxofre manteria suas propriedades físicas elásticas independente se exposta ao frio ou ao calor. Estava descoberto o processo de vulcanização (Figura 1).

Figura 1 - Estrutura molecular da borracha vulcanizada



Fonte: Santos Silva, 2011.

Em 1843 o processo foi anunciado amplamente, possibilitando a aplicação da borracha para demais finalidades. Em 1845, após fixar uma câmara de ar de borracha dentro de uma roda de madeira e metal, Robert Thompson patenteou o pneu. Somente em 1895 os pneus começaram a ser utilizados em automóveis de forma mais ampla após os irmãos Edouard e André Michelin criarem e patentearem sua invenção.

2.1.3 Influência na sociedade

Ao passo em que a população mundial cresceu nos últimos dois séculos, aumentou-se a demanda global de bens e serviços. Com a popularização dos veículos automotores no início do século XX, o transporte animal foi amplamente substituído. A possibilidade de ir mais longe e mais rápido atendeu aos interesses imediatos industriais, comerciais e pessoais, favorecendo o crescimento da frota de veículos em circulação, e consequentemente a indústria de pneus.

2.1.4 Impactos ambientais

Essenciais para maior parte de veículos, automotores ou não, os pneus são consumidos em uma escala crescente e a dificuldade em gerenciar seu resíduo causa grandes preocupações ambientais. Com tempo de degradação estimado em 600 anos na natureza, os pneus já descartados ou inservíveis são categorizados como “Classe II A – Não inertes” conforme NBR 10.004/2004, uma vez que apresentam concentrações de metais no extrato solubilizado acima do limite dos padrões estabelecidos.

O despejo incorreto desses pneus pode resultar em assoreamentos de rios e lagos, enchentes por obstrução de canais de escoamento de água, contaminação do solo (hidrocarbonetos pesados) e do ar (dioxinas) caso sejam queimados, proliferação de doenças e pragas a nível endêmico (VELOSO, 2015).

É notável que autoridades governamentais já voltaram suas atenções aos pneus descartados de formas clandestina na forma de galpões onde o despejo é autorizado e controlado pelo poder público direto ou indireto. Ainda assim, a destinação desses pneus inservíveis representa um desafio, dada a ausência ou desinteresse por parte da indústria.

2.1.5 Destinações e aplicações

As destinações usuais para pneus inservíveis são:

- Lixão: local clandestino e criminoso de descarte de resíduo sólidos urbanos. Não está submetido à nenhuma forma de controle ou regulamentação, sendo extremamente danoso à saúde dos arredores;
- Aterro sanitário: ainda que o aterro sanitário seja local designado para alguns tipos de resíduos sólidos urbanos, é proibido fazer descarte de pneus em locais como esse. Pneus levam cerca de 600 anos para se decomporem, e por isso poder oferecer riscos a longo tempo durante sua permanência no aterro, bem como podem prejudicar a compactação do solo do aterro devida a sua elasticidade.

- Reforma: após avaliação técnica, caso o pneu inservível esteja em condições de reparabilidade para passar por recapagem, recauchutagem ou remoldagem, será destinado à reforma;
- Reuso ou reciclagem: o pneu encontra-se irreparável para retornar ao uso comum, então é destinado aos agentes que farão o devido uso ou processamento.
- Aplicações práticas e artesanais: a utilização de pneus inservíveis é difundida devido ao seu apelo socioecológico e versatilidade no uso do material para confecção de diversos materiais que utilizam das suas propriedades elásticas.
- Incineração: após passar por etapas de processamento mecânico, a BRPI é separada dos metais e é utilizada como combustível através de combustão.

No ano de 2020, a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP) registrou a venda de aproximadamente 57 milhões de pneus em território nacional. Um levantamento realizado pela Reciclanip, iniciativa das fabricantes de pneus em atividade no mercado nacional para responsabilidade pós-consumo, atendendo à resolução 416 de 2009 do Conama, contabilizou mais de 42 milhões de unidades recolhidas em logística reversa para correta destinação, aproximadamente 380 mil toneladas do material. Deste quantitativo, cerca de 70% foi destinado ao coprocessamento, onde os pneus inservíveis são utilizados como fonte energética em usinas e fornos.

2.1.6 Composição

CZAJCZYNSKA et al. (2017), caracterizam a composição dos pneus comuns como a mistura de três materiais: borracha, metal e têxteis. A borracha utilizada nos pneus é uma mistura de borrachas de origem natural ou sintética, negro de fumo, sílica amorfa, agentes vulcanizantes e muitos aditivos, tais como zinco, enxofre, argilas e sílica ou óxidos de metal (ISLAM et al. 2007). A composição do pneu pode levar mais de cem compostos diferentes dependendo da sua finalidade.

Segundo MARTÍNEZ *et al.* (2013), os pneus são feitos de borracha (60-65% em peso), negro de fumo (carbono em dispersão fina produzido pela queima incompleta de derivados do petróleo) (CB) (25-35% em peso) e o resto consiste em aceleradores e enchimentos, que são adicionados durante o processo de fabricação. Os materiais emborrachados estão presentes na forma de C_xH_y , com alguns materiais fibrosos e são considerados polímeros termofixos. Os pneus de veículos (tanto para passageiros quanto para cargas) são principalmente uma mistura de borracha natural (NR) e sintética (SR), como borracha butílica (BR) e copolímero de estireno-butadieno (SBR).

Em *Waste Tire Pyrolysis: A Review* de MARTÍNEZ *et al.* (2013), é relatado que a Agência de Proteção Ambiental estadunidense (EPA) reconhece que a utilização de combustíveis derivados de BRPI como em fornos da linha de produção de cimentícios como destinação viável para pneus descartados, uma vez que a BRPI tem poder calorífico que contribui com outros combustíveis para o processo de queima, sendo alternativa para utilização de combustíveis fósseis no processo.

ADHIKARI *et al.* (2000), concluíram que a BRPI de pneus inservíveis contém mais de 90% de compostos orgânicos e possuem valor calorífico de 32,6 mJ/Kg. Por outro lado, o carvão dispõe de 18,6 mJ/Kg à 27,9 mJ/Kg. CZAJCZYNSKA *et al.* (2017) concluíram que pneus inservíveis podem alcançar até 40 mJ/Kg. LEUNG *et al.* (2002) chegaram até o resultado de 37,3 mJ/Kg. Os resultados se reafirmam e validam a vantajosidade do uso da BRPI como fonte energética secundária em usinas.

Ainda que a aplicação de BRPI em usinas na forma de combustível secundário seja alternativa viável em relação ao carvão e ajude a amenizar a carga da problemática ambiental acerca da reciclagem de pneus inservíveis, é necessário considerar que ainda há emissões de poluentes no processo de queima, como monóxido de carbono, óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis. Entretanto, pesquisadores e pioneiros vêm empregando o processo de pirólise a fim de alcançar maior aproveitamento energético da BRPI e reduzir as emissões de poluentes ou agentes nocivos ao meio ambiente.

2.2 Pirólise

De acordo com PEDROZA *et al.* (2010), conforme definido em

Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos em Processo de Pirólise, “a pirólise pode ser definida como a degradação térmica de qualquer material orgânico na ausência parcial ou total de um agente oxidante, ou em um ambiente com uma concentração de oxigênio baixa capaz de evitar a gaseificação do material orgânico”.

A pirólise pode ocorrer das formas conforme Tabela 1.

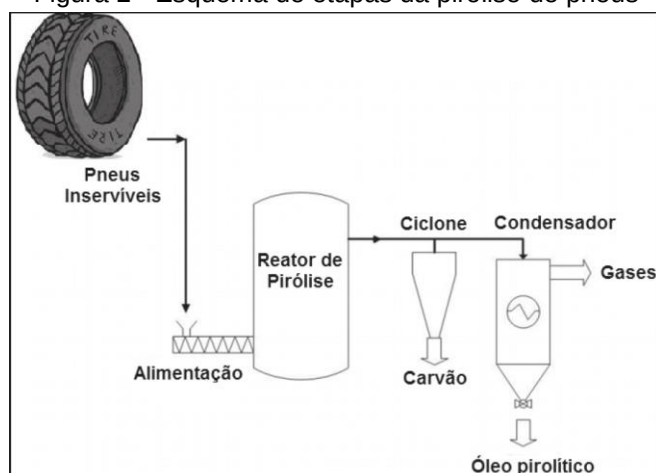
Tabela 1 - Variantes do processo de pirólise

Variantes do processo	Tempo de residência	Temperatura do processo, °C	Produtos obtidos
carbonização	horas/dia	400 – 450	carvão vegetal
convencional	5 – 30 min	até 600	óleo pirolítico, carvão e gás
rápida	0,5 – 5 s	500 – 550	óleo pirolítico
<i>flash</i> -líquido	< 1 s	< 650	óleo pirolítico
<i>flash</i> -gás	< 1 s	> 650	gás combustível
vácuo	2 – 30 s	400	óleo pirolítico
metano-pirólise	< 10 s	>700	produtos químicos
hidro-pirólise	< 10 s	<500	óleo pirolítico e produtos químicos

Fonte: Adaptado de Gómez, 2002.

MARTÍNEZ *et al.* (2013), explicam que por não haver presença de oxigênio no processo de pirólise como comburente, logo não há queima, não há liberação de gases poluentes e nem grandes perdas de energia. Para os pesquisadores, a pirólise atua como polimerização reversa, uma vez que a adição de calor ao material permite o rompimento de ligações químicas. Segundo os colaboradores, o processo de conversão de resíduos em combustíveis por meio da pirólise não é novidade, entretanto a utilização de BRPI como resíduo precursor para a obtenção de óleo pirolítico é recente (Figura 2).

Figura 2 - Esquema de etapas da pirólise de pneus



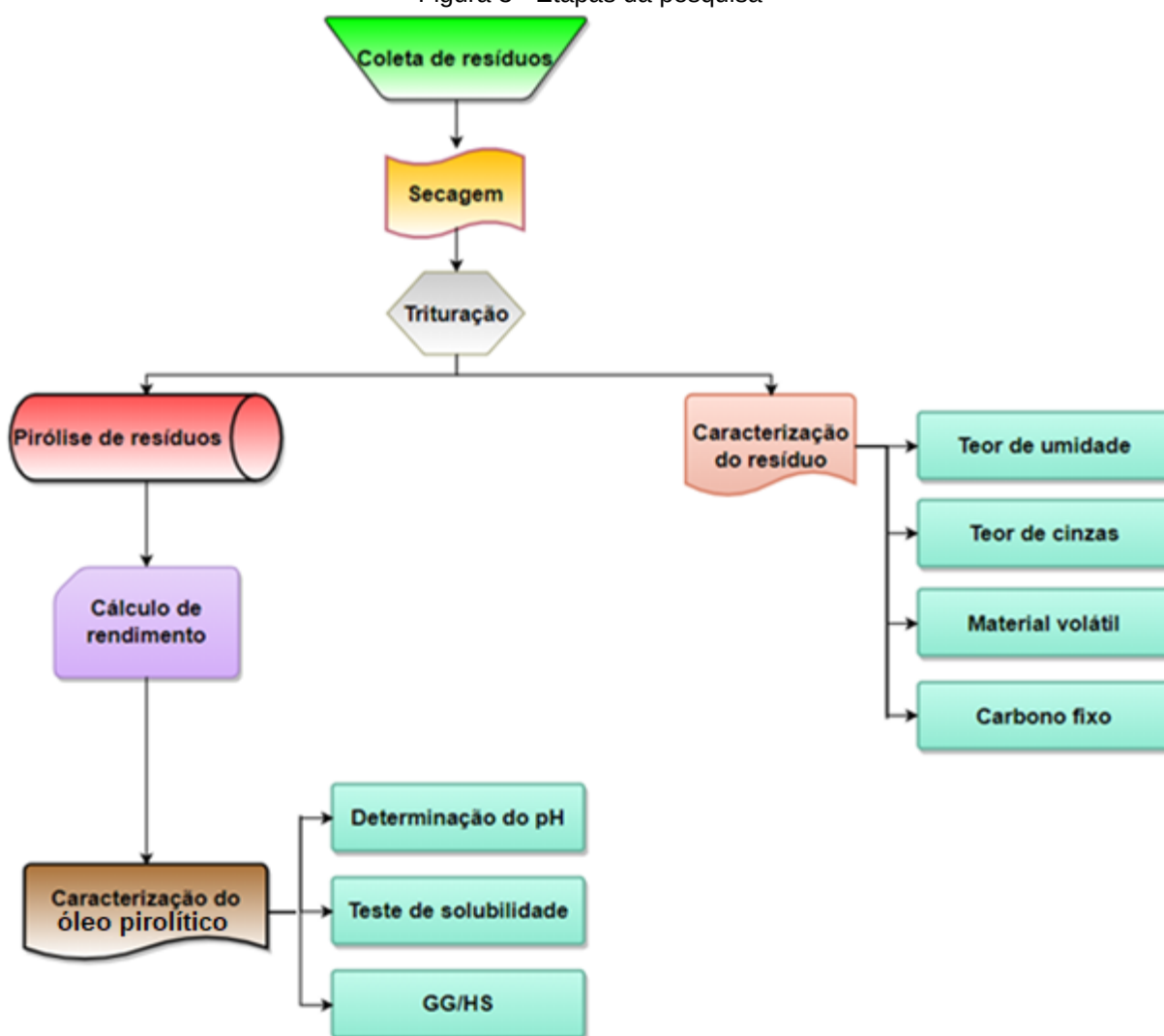
Fonte: SCHWALM *et al.* (2020).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 Contextualização da pesquisa científica

Esta pesquisa é do tipo aplicada, explicativa e experimental, sendo definidos três tópicos a serem contemplados no desenvolver das atividades práticas: (a) coleta e preparação do resíduo, (b) pirólise do material e (c) caracterização do óleo pirolítico obtido no processo (Figura 3). Essa pesquisa tem a participação das seguintes instituições: (a) Instituto Federal do Tocantins (IFTO, *Campus Palmas*); e (b) Universidade de São Paulo (USP).

Figura 3 - Etapas da pesquisa



Fonte: Autor, 2022.

3.2 Coleta do resíduo e preparação da amostra

A coleta do pneu inservível foi realizada na Brandão Borracharia, borracharia localizada na Quadra 806 Sul, Avenida LO 19, Lote 01 – Sala 01, em Palmas – TO (Figura 4). Não houve critério para escolha do local, apenas sendo necessária autorização do proprietário ou responsável presente para a retirada do pneu. Quanto ao pneu, foi escolhido o pneu descartado sem severas avarias à estrutura original, descartado por ter chegado ao fim da vida útil (Figura 5).

Figura 4 - Local da coleta do pneu



Fonte: Autor, 2022.

Figura 5 - Pneu escolhido para análise
(ao centro da imagem)

Fonte: Autor, 2022.

Para garantir a homogeneidade dos resíduos e facilitar os procedimentos analíticos, todas as amostras foram cortadas, o pneu de inservível foi cortado em tiras transversais de aproximadamente 3 centímetros de largura utilizando uma esmerilhadeira angular Black+Decker G720 com um disco de corte para metal de 7 polegadas (Figura 6). As tiras foram lavadas com água, escova e detergente a fim de remover resíduos ou impurezas contidas na superfície das tiras. Foram obtidas 263 gramas de pneus em tiras para a próxima etapa (Figura 7).

Figura 6 - Ferramenta de corte do pneu inservível



Fonte: Autor, 2022.

Figura 7 - Tiras de pneu coletadas



Fonte: Autor, 2022.

A secagem dos resíduos foi feita a 60 °C em uma estufa de marca Thoth Th-520.150.1 durante 24 horas.

Após o processo de trituração no triturador Trapp Trf-300 (figura 4) o resíduo foi peneirado em peneira com abertura de 1,41 mm (ABNT, Mesh 14), onde foram obtidos pequenos grânulos para o processamento.

3.3 Caracterização do material bruto

Durante a caracterização do material foram obtidas informações acerca do resíduo que podem possibilitar a justificação do seu tratamento termogravimétrico através do emprego da técnica de pirólise rápida para a produção de óleo pirolítico e outros produtos.

Nos processos de caracterização do resíduo realizados foram utilizados equipamentos e instrumentos de instituições de proponente e parcerias do projeto, podendo citar: (LARSEN) - Laboratório de Inovação e Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética no Instituto Federal do Tocantins - (IFTO/Campus Palmas) e Laboratório de Ciências dos Materiais da Universidade Federal do Cariri (UFCA/CE).

3.3.1 Teor de umidade

A determinação do teor de umidade (TU) do resíduo foi realizada de acordo com a norma ASTM D 3173-85. Uma massa de aproximadamente 1 grama do pneu foi destacada e pesada em um cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. Em seguida a amostra foi aquecida em uma estufa à temperatura de 105 °C por um período de 1 hora. Na sequência o cadinho foi colocado em um dessecador por 15 minutos e pesado. O experimento foi feito em triplicata e o teor de umidade foi determinado de acordo com a Equação 1.

$$\text{Teor de umidade (\%)} = \left(\frac{A - B}{C} \right) \times 100 \quad (1)$$

A = massa do cadinho vazio + massa da amostra

endo: B = massa do cadinho + massa amostra pós-aquecimento na estufa

C = massa da amostra

3.3.2 Teor de cinzas

Foi empregado o método sugerido por SANCHEZ et al., (2009) para a determinação do teor de cinzas (TC) contido no pneu. A massa de aproximadamente 1 grama do pneu foi destacada e adicionada em cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. A amostra foi então calcinada a 815 °C durante 30 minutos em um forno mufla da marca EDG Equipamentos, modelo W-One. Em seguida o cadinho foi resfriado em um dessecador de vidro por 1 hora e posteriormente foi feita a pesagem. O teor de cinzas foi determinado de acordo com Equação 2.

$$\text{Teor de cinzas (\%)} = \left(\frac{A - B}{C} \right) \times 100 \quad (2)$$

A = massa do cadinho + massa da amostra após calcinação

endo: B = massa do cadinho vazio

C = massa da amostra

3.3.3 Material volátil

A determinação do teor de material volátil (MV) do pneu foi obtida de acordo com método sugerido por SANCHEZ *et al.*, (2009). O método propõe que a determinação seja obtida em triplicata, pesando cerca de 1 grama de amostra em um cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. A amostra é aquecida em um forno mufla à temperatura de 915 °C, na ausência de oxigênio por um período de durante 30 minutos. O teor de material volátil foi obtido conforme apresenta a Equação 3.

$$\text{Material volátil (\%)} = \left(\frac{A - B}{C} \right) \times 100 \quad (3)$$

A = massa do cadinho + massa da amostra

endo: B = massa do cadinho + massa da amostra pós-aquecimento em forno mufla

C = massa da amostra

3.3.4 Teor de carbono fixo

Para determinação do teor de carbono fixo (CF) presente no resíduo foi efetuada a diferença descrita de conforme a Equação 4.

$$\text{Carbono fixo (\%)} = 100 - [TU(\%) - TC(\%) - MV(\%)] \quad (4)$$

TU = Teor de umidade

endo: TC = Teor de cinzas

MV = Material volátil

3.4 Pirólise em reator de leito fixo

A conversão térmica foi realizada em um reator de leito fixo FLYEVER modelo FE50RPN com núcleo tubular de aço (Figura 8), de 100 cm de comprimento

e diâmetro externo de 10 cm. Foi utilizada uma tira de pneu com peso de 109,25 gramas (Figura 9). A tira foi colocada na forma de grafite e levada ao interior do reator. O reator foi aquecido através de um forno bipartido reclinável.

Figura 8 - Reator de leito fixo



Fonte: Autor, 2022.

Figura 9 - Pesagem da amostra para pirólise



Fonte: Autor, 2022.

Foi acoplado ao reator um dispositivo termopar para realizar o monitoramento da temperatura no interior do leito. A pirólise se deu em duas etapas. A primeira etapa se dá com a introdução da tira do pneu dentro do reator aquecido à 200 °C e com tempo de permanência de 30 minutos nesse estado. Na segunda etapa a faixa de temperatura e taxa de aquecimento empregadas na planta de pirólise foi de 650 °C e 30 °C/min, respectivamente. O tempo de reação em todos os experimentos foi de 30 minutos.

3.5 Análise do Óleo pirolítico

3.5.1 Determinação do pH

O pH da amostra obtida após o ensaio de Pirólise foi determinado usando um pHmetro digital, da marca TECNAL, Figura 10.

Figura 10 - Análise do pH do óleo pirolítico



Fonte: Autor, 2022.

3.5.2 Teste de solubilidade

O teste de solubilidade foi o mesmo empregado por Oliveira (2020), onde foram utilizados alguns solventes, sendo eles: água, acetona, hexano, clorofórmio, diclorometano (Figura 11). No ensaio, um volume de amostra de 0,2 mL foi medido com auxílio de uma pipeta graduada e em seguida transferido para um tubo de ensaio, adicionando a este 3 mL de solvente. O material foi agitado e em seguida observado a solubilidade do material no solvente empregado.

Figura 11 - Solventes utilizados no teste de solubilidade



Fonte: Autor, 2022.

3.5.3 Análise cromatográfica

Para a identificação dos compostos constituintes do óleo pirolítico foi empregado um cromatógrafo modelo Varian CP 3800, acoplado a um detector de espectrometria de massas. Esses ensaios foram realizados no Laboratório da

Central Analítica da USP, São Paulo. A Tabela 2 apresenta as condições empregadas no ensaio.

Tabela 2 - Condições cromatográficas empregadas na análise do óleo pirolítico

Coluna	VF5MS (5% fenil, 95%metilsilicone)
Dimensões da coluna	30 m x 0,25 m x 0,10 µm
Temperatura do injetor	250 °C
Temperatura da interface	250 °C
Volume de injeção	0,5 µL
Razão do Split	1:50
Fluxo de gás hélio	1 mL/min

Fonte: Autor, 2022.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Quantitativo de resíduos de pneus

Os pneus inservíveis são uma parte significativa do fluxo de resíduos urbanos que tende a crescer em quantidade. Estimou-se que a Comunidade Europeia gerou cerca de 4,5 milhões de toneladas de pneus novos em 2010, com 289 milhões de pneus sendo substituídos naquele ano. Somente nos Estados Unidos, aproximadamente 500 milhões de pneus inservíveis foram gerados em 2007, com cerca de 128 milhões de pneus usados já estocados em todo o país. Na Austrália, cerca de 52,5 milhões de pneus de unidades equivalentes de passageiros (EPU) chegaram ao fim de sua vida útil (uma EPU = 8 kg) em 2007–2008. Aproximadamente 64% destes pneus foram para aterros ou foram despejados ou empilhados ilegalmente, enquanto apenas 13% deles foram reciclados. Em 1998, estimou-se que a produção e vendas mundiais de pneus atingiram um novo marco ao ultrapassar a marca de um bilhão, com estimativas de 2007 relatadas em 1,3 bilhão de pneus. Como é geralmente aceito que para cada pneu vendido no mercado outro se junta ao fluxo de resíduos, aproximadamente 1,3 bilhão de pneus chegam ao fim de seu ciclo de vida anualmente (QUEK E BALASUBRAMANIAN, 2013).

No dia 1º de outubro de 2009 foi publicado no Diário Oficial da União a Resolução 416/2009 do Conama, dispondo sobre a prevenção dos impactos ambientais causados pelo descarte incorreto de pneus inservíveis e atribuindo

responsabilidades de coleta e devida destinação aos fabricantes e importadores de pneus com peso superior a 2 quilogramas no território nacional, competindo ao Ibama estabelecer diretrizes para a verificação do cumprimento da Resolução. Deste modo, em 18 de março de 2010 foi publicada a Instrução Normativa nº 01, foi instituída o “Relatório de Pneumáticos: Resolução Conama nº 416/2009”, instrução que foi revogada após revisão e atualização através da Instrução Normativa nº 9, de 20 de julho de 2021. Preenchido por fabricantes, importadores e destinadores de pneus inservíveis inscritos no Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras e/ou Utilizadoras de Recursos Ambientais (CTF/APP), no relatório constam dados do balanço de pneumáticos no âmbito nacional: quantitativo inserido no mercado através de vendas, reposição ou montadoras, importadas e descartadas.

A Figura 12 exibe o histórico de pneus inservíveis recolhidos por unidade federativa ao longo de 10 anos, entre os anos 2010 e 2019. É possível observar que os estados com maior população são os que geram a maior carga de resíduos urbanos, bem como de pneus inservíveis.

Figura 12 - Histórico de toneladas de pneus inservíveis recolhidas por unidade federativa entre 2010 e 2019.

UF	Toneladas de pneus inservíveis recolhidas por ano										Total
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
Acre	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00%
Alagoas	5.561,05	2.691,99	2.432,86	2.310,77	1.259,21	2.265,85	3.213,84	1.475,04	139,11	470,38	0,42%
Amazonas	6.865,53	7.455,30	9.501,92	9.046,42	14.549,78	9.003,67	9.270,45	10.919,33	8.337,65	21.932,02	2,04%
Amapá	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00%
Bahia	4.260,79	10.368,78	7.436,29	9.488,90	9.919,86	10.037,14	15.337,33	20.059,21	17.904,00	21.312,45	2,41%
Ceará	2.971,30	980,90	1.009,87	1.278,30	1.749,43	2.047,61	878,33	6.430,14	1.792,65	1.773,20	0,40%
Distrito Federal	6.919,29	1.767,07	10.098,66	5.408,18	8.503,66	8.515,44	14.187,32	7.532,47	12.048,25	12.883,27	1,68%
Espírito Santo	106,47	4.449,32	3.626,34	2.556,60	-	890,00	-	-	-	48,04	0,22%
Goiás	21.648,81	19.710,41	10.419,99	14.307,10	17.327,72	15.040,36	15.832,20	15.707,14	19.227,57	23.404,01	3,29%
Maranhão	-	-	-	-	-	-	-	-	-	121,98	0,00%
Mato Grosso	7.978,46	3.848,13	9.364,22	14.847,92	20.105,67	35.042,69	26.103,66	20.011,55	35.960,96	32.238,54	3,92%
Mato Grosso do Sul	7.282,83	14.022,19	6.885,45	13.520,46	18.090,30	18.188,15	6.178,12	13.943,94	8.623,63	6.924,94	2,17%
Minas Gerais	85.975,46	68.915,86	77.851,52	93.217,41	103.553,00	110.146,55	89.646,06	96.796,80	103.168,94	118.044,56	18,08%
Pará	15,81	-	-	-	-	42,23	282,18	7.609,49	-	250,06	0,16%
Paraná	6.126,26	7.316,56	11.062,63	6.489,82	5.126,54	10.234,82	-	-	301,96	392,28	0,90%
Paraná	116.954,76	77.008,86	88.317,41	94.790,70	84.379,72	85.309,75	95.245,04	71.970,32	98.220,44	77.159,56	16,97%
Pernambuco	79,85	55,98	-	-	-	-	-	-	-	697,74	0,02%
Piauí	1.888,55	8.842,67	8.905,19	8.997,25	12.153,12	11.518,16	11.160,13	11.268,83	17.525,06	9.371,47	1,94%
Rio de Janeiro	47.626,86	35.110,24	40.211,04	21.927,72	35.629,49	31.597,72	25.973,36	47.513,07	50.687,31	29.684,31	6,98%
Rio Grande do Norte	-	-	-	-	-	-	-	546,85	969,34	631,84	0,04%
Rio Grande do Sul	14.796,64	19.062,97	14.688,97	16.765,37	22.338,92	17.410,72	13.891,58	33.665,55	24.818,78	35.438,87	4,06%
Rondônia	120,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00%
Roraima	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00%
Santa Catarina	260,52	194,72	137,71	6.440,65	15.203,41	13.061,61	20.791,17	18.284,34	9.727,07	21.224,93	2,01%
São Paulo	215.204,06	180.321,79	156.988,32	169.718,62	174.472,34	133.882,48	135.538,95	188.300,57	148.132,00	163.327,34	31,79%
Sergipe	2.464,32	333,46	91,81	540,82	333,23	4.689,41	9.869,41	13.175,11	8.719,62	8.059,28	0,92%
Tocantins	-	-	-	-	-	-	-	42,56	19,50	-	0,00%

Fonte: Autor, 2022.

A Figura 13 resume os dados da Figura 10 para a escala nacional. Ao observar seus dados, é fato que as quantidades vendidas e recolhidas mantêm-se em ritmo semelhante, o que indica que ao crescer o número de vendas, crescem

também o número de pneus inservíveis recolhidos, afirmando a efetividade da Resolução do Conama nº 416/2009.

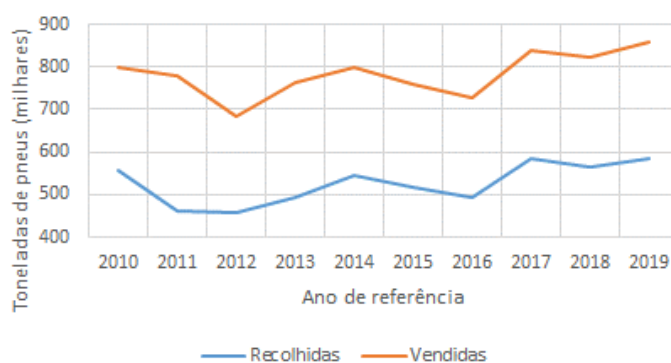
Figura 13 - Relação entre toneladas recolhidas e vendidas de pneus

Ano	Toneladas	
	Recolhidas	Vendidas
2010	555.107,62	800.482,34
2011	462.457,19	779.729,53
2012	459.030,19	684.899,43
2013	491.653,02	764.668,28
2014	544.695,39	797.234,78
2015	518.924,36	760.685,42
2016	493.399,13	729.214,04
2017	585.252,31	839.863,47
2018	566.323,84	821.334,06
2019	585.391,07	859.994,68

Fonte: Autor, 2022.

A Figura 14 é uma adaptação dos dados da Figura 13 para um gráfico de linhas, a qual demonstra de modo mais claro os movimentos de vendas e de recolhimentos de pneus inservíveis, mantendo uma média 257 mil toneladas de diferença entre toneladas que entraram no mercado de consumo e toneladas descartadas.

Figura 14 - Gráfico de toneladas pneus vendidas e recolhidas no Brasil entre 2010 e 2019.



Fonte: Autor, 2022.

A Figura 15 traz informações sobre a destinação dos pneus recolhidos ao longo de uma década. São consideradas seis destinações: três estão relativamente determinadas e mais estáveis, enquanto que as outras três passaram por grandes variações nos últimos anos.

Figura 15 - Destinação das toneladas recolhidas de pneus inservíveis entre 2010 e 2019

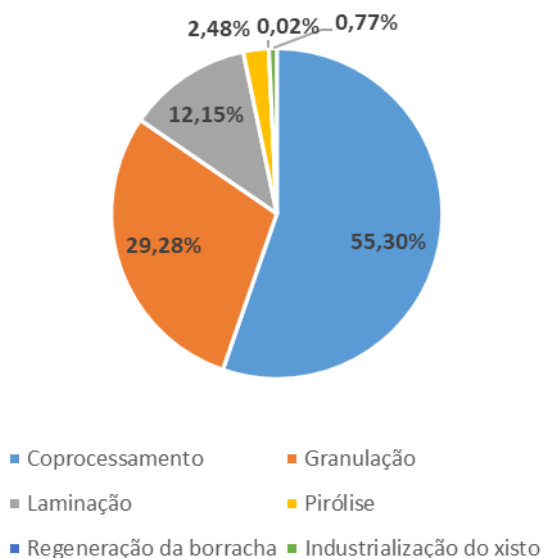
Toneladas recolhidas de pneus inservíveis										
Destinação	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Coprocessoamento	294.956,94	256.481,24	219.269,09	267.448,35	300.510,70	307.015,71	297.168,80	274.814,61	326.401,99	366.188,58
Granulação	160.768,18	138.313,28	168.499,14	165.574,82	189.699,79	122.239,97	133.940,43	215.603,68	135.019,54	110.878,32
Laminação	91.714,70	59.197,87	61.115,93	43.839,44	54.168,62	82.807,09	56.945,41	81.625,60	95.596,99	12.535,83
Pirólise	0,00	0,00	336,03	72,94	0,00	6.599,49	5.344,49	13.208,44	9.305,31	95.788,35
Regeneração da borracha	118,29	130,62	0,00	17,47	316,28	262,10	0,00	0,00	0,00	0,00
Industrialização do xisto	7.549,51	8.334,18	9.810,00	14.700,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Percentual de toneladas recolhidas de pneus inservíveis										
Destinação	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Coprocessoamento	53,14%	55,46%	47,77%	54,40%	55,17%	59,16%	60,23%	46,96%	57,64%	62,55%
Granulação	28,96%	29,91%	36,71%	33,68%	34,83%	23,56%	27,15%	36,84%	23,84%	18,94%
Laminação	16,52%	12,80%	13,31%	8,92%	9,94%	15,96%	11,54%	13,95%	16,88%	2,14%
Pirólise	0,00%	0,00%	0,07%	0,01%	0,00%	1,27%	1,08%	2,26%	1,64%	16,36%
Regeneração da borracha	0,02%	0,03%	0,00%	0,00%	0,06%	0,05%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Industrialização do xisto	1,36%	1,80%	2,14%	2,99%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Autor, 2022.

A Figura 16 resume a informação de uma década de forma a facilitar a leitura do que vem acontecendo. É evidenciado que pouco mais da metade dos pneus coletados são utilizados de forma direta como combustíveis em linhas de produção que requerem elevadas temperaturas, como na produção de cimentíceos. Tal destinação é prejudicial, como já citado, pois contribui com a poluição da atmosfera através da emissão de partículas poluentes bem como a volatilização de metais pesados.

Figura 16 - Gráfico demonstrativo da destinação de toneladas de pneus inservíveis entre 2010 e 2019.

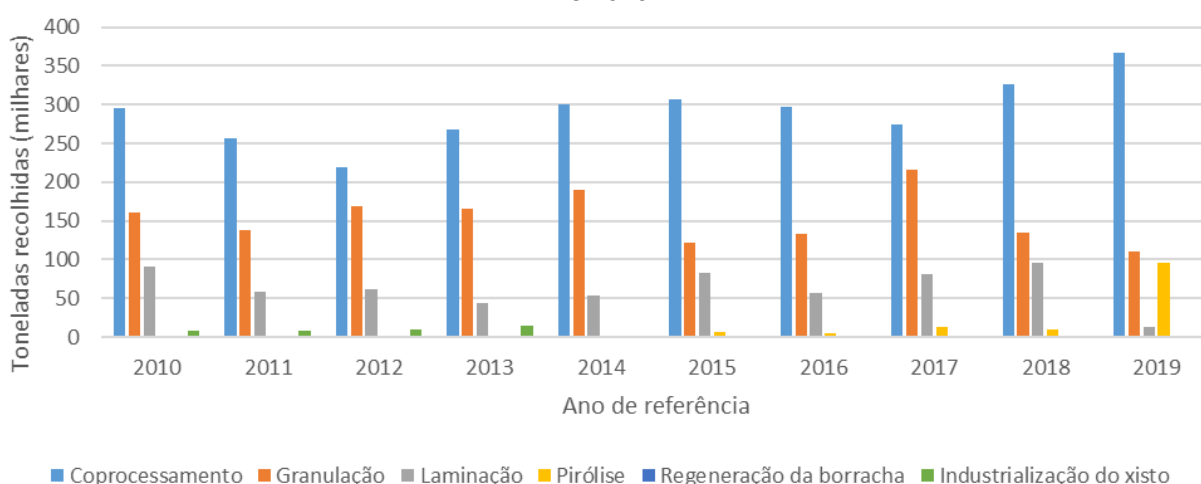


Fonte: Autor, 2022.

A Figura 17 expõe o comportamento da destinação dos pneus inservíveis

recolhidos nos últimos 10 anos. Entretanto é no último ano dos dados disponibilizados pelo IBAMA que basicamente ocorre inversão dos números de laminação e pirólise. A laminação é o processo pelo o qual os pneus são cortados e aplicados de forma direta principalmente na fabricação de outros produtos, mantendo sua característica química e física. Ainda que a laminação pareça sustentável e proveitosa, há geração de resíduos durante o corte e manejo dos pneus, resíduos que são descartados de forma incorreta. A inversão da pirólise sobre a laminação pode ser considerada benéfica, uma vez que a pirólise não emite poluentes durante sua operação.

Figura 17 - Gráfico evolutivo da destinação das toneladas de pneus inservíveis recolhidos entre 2010 e 2019.



Fonte: Autor, 2022.

4.2 Resultados da caracterização do material bruto

A Tabela 3 contempla os resultados obtidos através das determinações do teor de umidade, do teor de cinzas, do material volátil e do carbono fixo. Os resultados analíticos corroboram com os resultados de outros autores, contudo, é notório que o teor de cinzas não é homogêneo entre si. Isso pode ser oriundo tanto pela diferença do mercado local dos pneus onde os autores realizaram as análises, quanto pela própria heterogeneidade singular da amostra, dada a complexidade estrutural dos pneus e a disposição estratégica dos seus componentes. É válido ressaltar que o teor de cinzas representa o percentual de massa inorgânica contida na amostra, deste modo, o alto teor de cinza representa produção de óleo pirolítico diminuta. Ainda assim, é possível observar que os resultados das análises

corroboram amplamente com os resultados de outros autores.

Tabela 3 – Resultados da análise imediata da BRPI

	BRPI	NKOSI E MUZENDA, 2014	JANAJREH E RAZA, 2015	PORTOFINO ET AL, 2013
TEOR DE UMIDADE (%)	0,9	0,6	1	0
TEOR DE CINZAS (%)	11,3	4,8	8,8	6,8
MATERIAL VOLÁTIL (%)	62,1	66,6	68	25,5
CARBONO FIXO (%)	25,7	28	23,2	67,7

Fonte: Autor, 2022.

4.3 Rendimentos dos produtos obtidos na pirólise de pneu

A Tabela 4 apresenta os dados de rendimentos das frações sólida e líquida obtidas durante a pirólise de pneu em reator de leito fixo.

O rendimento de óleo de pirólise obtido nessa pesquisa foi de 36,6 %. O valor de rendimento de óleo de pirólise obtido nessa pesquisa encontra-se dentro da faixa de rendimentos reportada por outros pesquisadores.

Williams *et al.* (1990) variaram as temperaturas de pirólise de 300 a 720 °C e taxas de aquecimento de 5 a 80 °C/min para a pirólise de pneus sob atmosfera de nitrogênio em um reator de leito fixo. Eles descobriram que temperaturas e taxas de aquecimento mais altas produziram maiores rendimentos de óleo, com 3% de rendimento a 300 °C e 54,8% de rendimento a 720 °C quando uma taxa de aquecimento de 5 °C /min foi usada. Rombaldo *et al.* (2008) mostraram que as três variáveis de temperatura, pressão e taxa de aquecimento foram significativas para o rendimento do óleo de pirólise, e que as interações entre temperatura e pressão e taxa de aquecimento e pressão foram significativas. Eles também concluíram que pressões mais baixas, temperaturas mais altas e taxas de aquecimento mais altas levam a maiores rendimentos de óleo. A tendência de temperaturas de pirólise mais altas produzindo maiores rendimentos de óleo foi corroborada por outros pesquisadores (MASTRAL *et al.*, 2000).

Mastral *et al.* (2000) observaram maiores rendimentos com maiores temperaturas de pirólise e menores taxas de aquecimento, com rendimento de óleo abaixo de 40% a 400 °C, e 45% a 600 °C. Díez *et al.* (2004) também descobriram que o rendimento do óleo aumentou quando os pneus foram pirolisados em

temperaturas mais altas, com 30% em peso a 350 °C e 38 % em peso a 550 °C.

Tabela 4 - Rendimentos dos produtos (óleo pirolítico e carvão) obtidos durante a pirólise de pneu

Produtos da pirólise	Resultados (%)
Óleo	36,6
Carvão	45,9

Fonte: Autor, 2022

A Figura 18 apresenta o carvão obtido no processo. O rendimento de carvão dessa pesquisa foi de 45,9 %. Foi observada a presença de estruturas metálicas na composição do carvão obtido nessa pesquisa, o que demonstra que durante o processo térmico os metais presentes não são fundidos nas temperaturas empregadas durante o processo.

Figura 18 - Carvão obtido durante a pirólise de pneu em reator de leito fixo



Fonte: Autor, 2022.

O carvão da pirólise de pneu tem alto potencial para ser utilizado como carvão ativado após tratamento térmico, o que aumenta o seu valor agregado (ANTONIOU; STAVROPOULOS; ZABANIOTOU, 2014; TENG et al., 1995 SAN MIGUEL; FOWLER; SOLLARS, 2003; MURILLO et al. 2005). De acordo com Helleur et al. (2001), o carvão ativado produzido a durante a pirólise de pneu pode ser usado como um carvão alternativo para a remoção de pigmentos de cor em indústrias de corantes e outros produtos químicos em efluentes industriais.

Singh et al. (2019), relatam que a pirólise de resíduos de pneus produziu

uma quantidade significativa de carvão com alta área superficial e que após processo de ativação poderia melhorar ainda mais esta propriedade e ser utilizado como carvão ativado no tratamento de águas residuais.

4.3.1 Resultado do teste de solubilidade

A Tabela 5 apresenta o resultado do ensaio de solubilidade realizado com o óleo pirolítico obtido. É possível abstrair do teste de solubilidade que o óleo pirolítico é uma substância apolar, pois formou mistura heterogênea com a água, uma substância polar, e formou misturas homogêneas com a acetona, hexano e diclorometano, que são substâncias apolares.

Tabela 5 - Teste de solubilidade do óleo pirolítico	
Tipo de Solvente	Resultado
Água	Mistura Heterogênea
Acetona	Mistura Homogênea
Hexano	Mistura Homogênea
Diclorometano	Mistura Homogênea

Fonte: Autor, 2022.

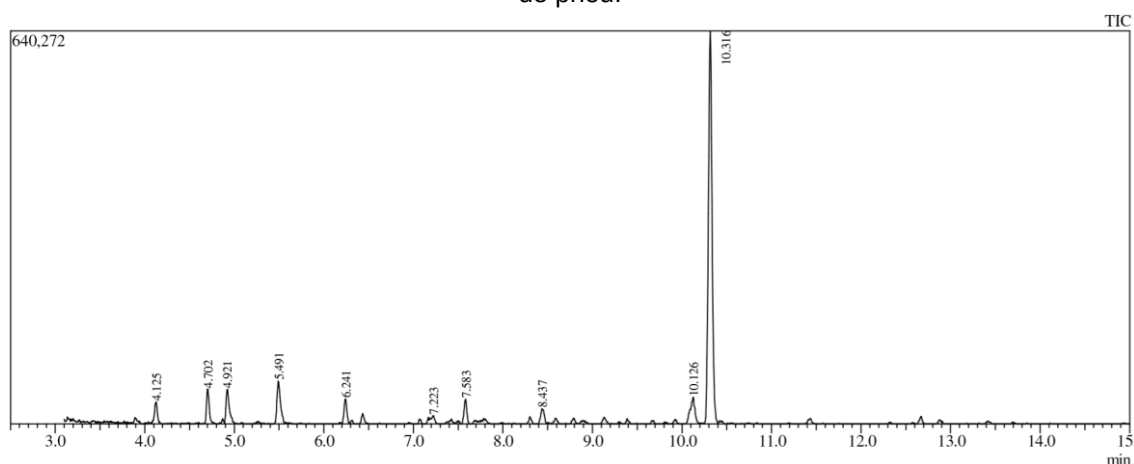
4.3.2 Resultado do teste de pH

O pH da amostra de óleo pirolítico analisado foi de 4,3, sendo considerado um óleo pirolítico ácido. Valores de pH abaixo da neutralidade estão associados com a presença de compostos fenólicos e de ácidos carboxílicos, proporcionando-lhe uma certa instabilidade, de modo que se misturado com água, e submetidos a elevadas temperaturas, proporciona ao óleo pirolítico a capacidade de corrosão (RODRÍGUEZ, 2006; PEDROZA, 2011).

4.3.3 Caracterização do óleo pirolítico obtido no processo de pirólise de pneu

A Figura 19 apresenta o cromatograma obtido durante a análise de óleo pirolítico obtido durante a pirólise de pneu.

Figura 19 - Cromatograma obtido na análise cromatográfica do óleo pirolítico obtido durante a pirólise de pneu.



Fonte: Autor, 2022.

A Tabela 6 apresenta os nomes dos compostos químicos presentes no óleo pirolítico obtido durante a pirólise de pneu.

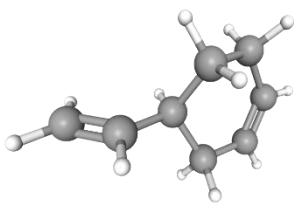
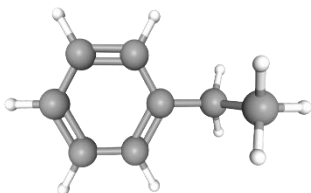
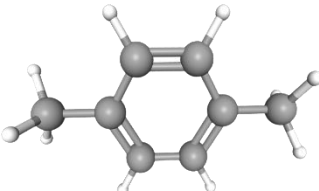
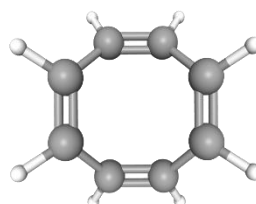
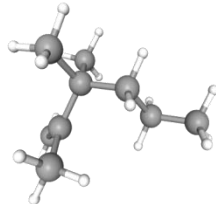
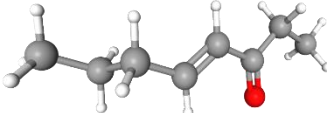
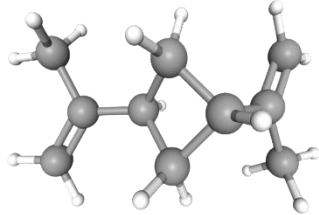
Tabela 6 - Tempo de retenção dos compostos presentes no óleo pirolítico obtido durante a pirólise de pneu.

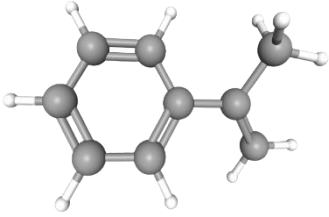
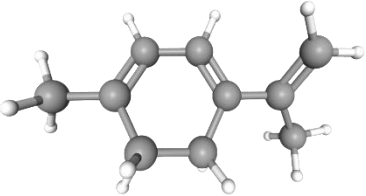
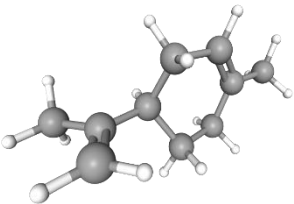
PICO	Tempo de retenção (min)	NOME
1	4,085	4-Vinilciclohexeno
2	4,665	Etilbenzeno
3	4,890	p-Xileno
4	5,445	1,3,5,7-Ciclooctatetraeno
5	6,200	2,3,3-Trimetil-1-hexeno
6	7,145	4-Octen-3-ona
7	7,545	1,3-Diisopropenil-ciclobutano
8	8,400	α -Metilestireno
9	10,045	p-Mentatrieno
10	10,185	d-Limoneno

Fonte: Autor, 2022.

O Quadro 1 apresenta as estruturas químicas dos compostos presentes no óleo pirolítico obtido durante a pirólise de pneu.

Quadro 1 - Estrutura química dos compostos encontrados

FÓRMULA ESTRUTURAL	NOMES DO COMPOSTO
	4-Vinilciclohexeno 4-Vinil-1-ciclohexeno 4-Etenilciclohexeno Ciclohexeno, 4-etenil-
	Etilbenzeno Feniletano Etil benzeno
	p-Xileno para-Xileno 1,4-Dimetilbenzeno 1,4-Xileno
	1,3,5,7-Ciclooctatetraeno [8]-Anuleno Ciclooctatetraeno Cicloocta-1,3,5,7-tetraeno
	2,3,3-Trimetil-1-hexeno
	4-Octen-3-ona Oct-4-en-3-ona
	1,3-Diisopropenil-ciclobutano Ciclobutano, 1,3-diisopropenil- 1,3-Diisopropenilciclobutano

	α-Metilestireno alpha-Metilestireno 2-Fenilpropeno Isopropenilbenzeno 2-Fenil-1-propeno
	p-Mentatrieno p-Menta-1,3,8-trieno 1,3,8-p-Mentatrieno p-1,3,8-Mentatrieno
	d-Limoneno Limoneno 1-Metil-4-(1-Metiletenil)-ciclohexeno

Fonte: Pubchem (National Center for Biotechnology Information), 2022.

É válida a ressalva que o processo de pirólise se caracteriza pela degradação térmica de compostos orgânicos de grandes cadeias carbônicas em estruturas mais simples de menor massa molecular. O pneu usado nessa pesquisa foi submetido ao processo de pirólise com o objetivo de se produzir compostos com cadeias carbônicas mais simples visando o seu uso como combustível. Como os pneus são compostos principalmente de hidrocarbonetos de cadeia longa, o reprocessamento de pneus para obter esses compostos poderia fornecer uma maneira econômica de tratar essa forma de resíduo, recuperando os hidrocarbonetos da BRPI para fins energéticos ou para as cadeias de produção da ampla indústria (MARTÍNEZ et al., 2013). Consequentemente, o reprocessamento de pneus poderia acarretar na redução da dependência dos combustíveis fósseis, o que por sua vez, ajudaria a mitigar as ameaças de escassez de combustíveis não renováveis e as mudanças climáticas.

São elencados a seguir alguns compostos obtidos durante a pirólise de pneus e os seus usos e aplicações.

O 4-Vinilciclohexeno (VCH) é um hidrocarboneto aromático de fórmula molecular $C_6H_9CH=CH_2$. Consiste em um grupo vinil ligado à posição 4 do anel do ciclohexeno. Sendo um líquido incolor, fétido e bastante volátil, é principalmente utilizado na produção de dióxido de 4-vinilciclohexeno (VCD) através da epoxidação

junto ao ácido peroxibenzóico. O VCD é amplamente utilizado pela indústria como agente de reticulação para a produção de resinas epóxi e como agente ovotóxico para o controle de pragas como ratos e baratas. O VCH é utilizado também na produção de retardantes antichamas. Sua hidrogenação para etilciclohexano pode ser utilizado como solvente apolar.

O Etilbenzeno (EB) é um hidrocarboneto aromático de fórmula molecular $C_6H_5CH_2CH_3$. Consiste em um radical etil ligado a um carbono da cadeia do benzeno. É um hidrocarboneto aromático comumente encontrado em sua forma líquida, a qual é inflamável e de odor semelhante ao da gasolina. Largamente empregado na produção de estireno, o qual pode ser convertido em poliestireno, o etilbenzeno faz parte da cadeia de produção de vários produtos industrializados, quer sejam utilizados pela indústria ou pelo consumidor final.

O p-Xileno é um composto orgânico de fórmula molecular $CH_3(C_6H_4)CH_3$. Faz parte do grupo dos xilenos juntamente com o o-Xileno (orto-xileno) e o m-Xileno (meta-xileno). É um isômero do etilbenzeno. Formado por grupos funcionais metil diametralmente dispostos na estrutura de um anel benzênico, o p-Xileno é um líquido incolor semelhante à água, porém inflamável e com odor adocicado que lembra o balsamo. É encontrado naturalmente na queima de carvão ou de petróleo. Industrialmente, está presente em combustíveis, tintas, solventes, borracha e embalagens plásticas.

O 1,3,5,7-Ciclooctatetraeno (COT) é um hidrocarboneto insaturado de fórmula molecular C_8H_8 . Derivado do Ciclooctano, o COT se apresenta como líquido ligeiramente amarelado e inflamável. É empregado na fabricação de filmes orgânicos para melhoramento do desempenho de propriedades físico-químicas de superfícies de silício, como células fotovoltaicas. Além disso, é empregado também na fabricação de lasers do tipo dye, também conhecido como corante, o qual tem aplicação desde astronomia até medicina. É também utilizado como material anódico para baterias recarregáveis, gerando cátodos orgânicos de alto desempenho se fundido às moléculas de carbono.

O 2,3,3-Trimetil-1-hexeno é um hidrocarboneto de fórmula molecular $(CH_3)_3CC(CH_3)=CH_2$. Sendo encontrado nos mais variados subprodutos do petróleo, o composto ainda não é utilizado de maneira isolada pela indústria.

O 4-Octen-3-ona é um hidrocarboneto de fórmula molecular $CH_3CH_2C(O)CH=CH(CH_2)_2CH_3$. Em temperatura ambiente é encontrado na forma

líquida, de cor levemente amarelada e com atenuado odor de coco. Devido à essa última característica, o 4-Octen-3-ona é empregado como flavorizante pela indústria.

O 1,3-Diisopropenil-ciclobutano é um hidrocarboneto de fórmula molecular $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{C}_4\text{H}_6\text{C}(\text{CH}_3)=\text{CH}_2$. Assim como o 2,3,3-Trimetil-1-hexeno, ainda não tem aplicabilidade de forma isolada como produto final na indústria, ainda que seja encontrado em diversos produtos de origem natural.

O α -Metilestireno (AMS) é um hidrocarboneto de fórmula molecular $\text{C}_6\text{H}_5\text{C}(\text{CH}_3)=\text{CH}_2$. Em temperatura ambiente se apresenta como um líquido incolor, pouco volátil, porém bastante inflamável, tóxico e de odor desagradável. É empregado comumente como monômero na produção de polímeros como o poliestireno, como solvente na produção de outros químicos, como plastificante para resinas e como reforço térmico para plásticos e borrachas.

O p-Mentatrieno, ou somente Mentatrieno, é um hidrocarboneto de fórmula molecular $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{C}_6\text{H}_6\text{CH}_3$. Por possuir odor terpênico, é comumente empregado pela indústria de cosméticos e alimentos por sua fragrância e sabor.

O d-Limoneno é um hidrocarboneto de fórmula molecular $\text{CH}_2(\text{CH}_3)\text{C}_6\text{H}_8\text{CH}_3$. É encontrado naturalmente em cascas de frutas cítricas. É um líquido tanto que oleoso, volátil, incolor de sabor e odor agradável de limão. Sua aplicação industrial é ampla: a indústria alimentícia o utiliza como flavorizante; a indústria de cosméticos utiliza como fragrância; a indústria farmacêutica utiliza na produção de medicamentos por sua propriedade hipocolesterolêmica. Ainda pode ser utilizado como solvente, tendo vantagem por ser biodegradável e atóxico, e como desengraxante de partes mecânicas.

5 CONCLUSÕES

O trabalho apresentado abordou a análise do óleo pirolítico obtido através da pirólise convencional da borracha residual de pneus inservíveis.

Após a abordagem de aspectos culturais, sociais, naturais e científicos, é possível concluir que a conversão da BRPI em óleo pirolítico é viável em todos estes aspectos, dada a vasta aplicabilidade dos compostos encontrados no óleo pirolítico. Não obstante ao tema central deste trabalho, foi possível verificar o direcionamento crescente dos pneus inservíveis às usinas de pirólise conforme os Relatórios de Pneumáticos publicados pelo IBAMA. Tal crescimento pode estar baseado no alto

rendimento energético da pirólise, pois no contexto de processos de pirólise de BRPI, utilizando diferentes tecnologias já empregadas e estudadas, os processos mostraram-se autossuficientes em relação às suas necessidades energéticas (LARESGOITI et al., 2000; AYLÓN et al., 2007; KYARI, M.; CUNLIFFE, A.; WILLIAMS, P. T., 2005; GALVAGNO et al., 2002), podendo o gás produzido durante a pirólise ser utilizado para retroalimentação do reator, restando então o aproveitamento energético da fase sólida, bem como constituintes inorgânicos que podem ser direcionados à reciclagem, como a fase líquida representada pelo óleo pirolítico. Foi possível notar que os resultados alcançados corroboraram com pesquisa de outros autores, tanto as análises imediatas que caracterizam a BRPI utilizada para pirólise quanto os compostos encontrados no óleo pirolítico, sendo uma significativa parcela destes hidrocarbonetos aromáticos, líquidos em temperatura ambiente, insolúveis em água, tendo como principal finalidade a aplicação como combustíveis, como solventes para indústria ou como matéria prima para fabricação de embalagens plásticas.

Visando a sequência deste trabalho, recomenda-se o estudo de viabilidade econômica em relação às aplicações tecnológicas do óleo pirolítico a fim de quantificar o balanço financeiro de investimento e lucratividade. É de se notar que a destinação de pneus inservíveis ainda é tímida em relação às outras finalidades e a fonte desse fato é intrigante. Seria o custo de implantação da usina de pirólise alto? Seria a produção do óleo pirolítico financeiramente inviável? São questionamentos que o presente trabalho não se atentou a responder, contudo, trabalhos científicos são como elos de uma corrente que se ligam, se fortificam e movem o mundo em desenvolvimento que necessita ser sustentável.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA n. 416, de 30 de Setembro de 2009**. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=616>. Acesso em: 13 mar. 2021.

SEST SENAT. **Cerca de 450 mil toneladas de pneus são descartadas por ano no Brasil**. Disponível em: <https://www.sestsenat.org.br/imprensa/noticia/cerca-de-450-mil-toneladas-de-pneus-sao-descartados-por-ano-no-brasil>. Acesso em: 15 mar. 2021.

IBGE. **Frotas de veículos**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/22/28120>. Acesso em: 15 mar. 2021.

INMETRO. **Ciclo de vida dos pneus**. Disponível em: <http://inmetro.gov.br/painelsetorial/palestras/Zilda-Maria-Faria-Veloso-Ciclo-Vida-Pneus.pdf>. Acesso em 15 mar. 2021.

ANIP. **Vendas de pneus fecham o ano de 2020 com baixa de 12,9%**. Disponível em: https://www.anip.org.br/sitenovo/wp-content/uploads/2021/01/ANIP_infografico_DEZ_PORT.pdf. Acesso em: 08 abr. 2021.

ISLAM, M.R. *et al.* Liquid fuels and chemicals from pyrolysis of motorcycle tire waste: Product yields, compositions and related properties. **Fuel**, v. 23, p. 3113, 2008.

MARTÍNEZ, J.D *et al.* Waste tyre pyrolysis – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 23, p. 181, 2013.

MARTÍNEZ, J.D. *et al.* Carbon black recovery from waste tire pyrolysis by demineralization: Production and application in rubber compounding. **Waste Management**, v. 85, p. 574–584, 2019.

ANIP. **História do Pneu**. Disponível em: <https://www.anip.org.br/historia-e-fabricacao/>. Acesso em: 13 mar. 2021.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Resíduos Sólidos: Classificação: 10004:2004**. Disponível em: <http://analiticaqmc.paginas.ufsc.br/files/2013/07/residuos-nbr10004.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2021.

CZAJCZYNSKA, D. *et al.*, **Use of pyrolytic gas from waste tire as a fuel: A review**. **Energy**, v. 1, p. 3-4, 2017.

Leung, D.Y.C. *et al.*, Pyrolysis of tire powder: influence of operation variables on the composition and yields of gaseous product. **Fuel Processing Technology**, v. 79, p. 146, 2002.

B. Adhikari, D. De e S. Maitin, **Reclamation and recycling of waste rubber**, Progress in Polymer Science, 25, 909-948, 2000.

VELOSO, Z.M.F., **Ciclo de vida dos pneus**. Departamernto de Qualidade Ambiental na Indústria. 2015. Disponível em: <http://inmetro.gov.br/painelsetorial/palestras/Zilda-Maria-Faria-Veloso-Ciclo-Vida-Pneus.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2021.

VIEIRA, G.E.G. *et al.*, **O processo de pirólise como alternativa para o aproveitamento do potencial energético de lodo de esgoto – uma revisão**. Revista Liberato, v. 12.

SANTOS, A.S; SILVA, G.G., **O Tênis Nosso de Cada Dia**. Disponível em: http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc31_2/02-QS-0908.pdf. Acesso em: 14 mar. 2021.

SCHWALM, P.C. *et al.*, **Pirólise de pneus inservíveis para fins energéticos: uma revisão dos produtos de pirólise e suas aplicações**. Revista Liberato, Novo Hamburgo, v. 21, n. 36, p. 101-204, 2020.

FERREIRA, P. P. L. **Pirólise rápida de borracha residual de pneus inservíveis (BRPI) utilizando catalisadores de Fe**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

AYLÓN, E. *et al.* Emissions from the combustion of gas-phase products at tyre pyrolysis. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 79, p. 210-214, 2007. DOI: 10.1016/j.jaap.2006.10.009.

GALVAGNO, S. *et al.* Pyrolysis process for the treatment of scrap tyres: preliminary experimental results. Waste Management, v. 22, p. 917-923, 2002. DOI: 10.1016/S0956-053X(02)00083-1.

LARESGOITI, M. F. *et al.* Characterization of the liquid products obtained in tyre pyrolysis. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 71, p. 917-934, 2004. DOI: 10.1016/j.jaap.2003.12.003.

KYARI, M.; CUNLIFFE, A.; WILLIAMS, P. T. Characterization of oils, gases, and char in relation to the pyrolysis of different brands of scrap automotive tires. Energy Fuel, v. 19, p. 1165-1173, 2005. DOI: 10.1021/ef049686x.

MASTRAL, A. M. *et al.* Influence of process variables on oils from tire pyrolysis and hydrolysis in a swept fixed bed reactor. Energy Fuel, v. 14, p. 739-744. 2000. DOI: 10.1021/ef990183e.

Relatórios de pneumáticos. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/relatorios/pneumaticos/relatorio-de-pneumaticos>. Acesso em: 10 maio 2022.

Quek, A., Balasubramanian, R. Liquefaction of waste tires by pyrolysis for oil and chemicals—A review. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 101 (2013) 1 – 16.

PUBCHEM. 4-Vinylcyclohexene. Disponível em:
<<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/4-Vinylcyclohexene>>. Acesso em: 14 maio 2022.

4-Vinylcyclohexene (CHEBI:82377). Disponível em:
<<https://www.ebi.ac.uk/chebi/searchId.do?chebiId=CHEBI:82377>>. Acesso em: 14 maio 2022.

4-Vinyl-1-cyclohexene CAS#: 100-40-3. Disponível em:
<https://www.chemicalbook.com/ProductChemicalPropertiesCB8852577_EN.htm>. Acesso em: 14 maio 2022.

4-Vinylcyclohexene. Disponível em: <https://www.chemsrc.com/en/cas/100-40-3_28889.html>. Acesso em: 14 maio 2022.

Etilbenzeno, o que é ? seus usos - GreenView Consultoria Ambiental. Disponível em: <<https://greenviewgv.com.br/etilbenzeno/>>. Acesso em: 14 maio 2022.

PUBCHEM. **Ethylbenzene**. Disponível em:
<<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Ethylbenzene>>. Acesso em: 14 maio 2022.

Mercado de etilbenzeno | 2022 - 27 | Participação da indústria, tamanho, crescimento - Mordor Intelligence. Disponível em:
<<https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/ethylbenzene-market>>. Acesso em: 14 maio 2022.

PUBCHEM. **P-Xylene**. Disponível em:
<<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/p-xylene>>. Acesso em: 14 maio 2022.

Xilol (Xileno) - QUIMESP QUÍMICA. Disponível em:
<<https://www.quimesp.com.br/xilol-xileno.php#:~:text=XILENO%20%C3%A9%20largamente%20utilizado%20pelas>>. Acesso em: 14 maio 2022.

BREDA, F. **Xileno**. Disponível em:
<<https://www.portalsaofrancisco.com.br/quimica/xileno>>. Acesso em: 14 maio 2022.

Paraxylene | P-Xylene | Uses, Benefits, and Chemical Safety Facts. Disponível em:
<<https://www.chemicalsafetyfacts.org/paraxylene/>>. Acesso em: 14 maio 2022.

Cyclooctatetraene. Disponível em:
<<https://www.chemeurope.com/en/encyclopedia/Cyclooctatetraene.html>>. Acesso em: 14 maio 2022.

1,3,5,7-Cyclooctatetraene | 629-20-9. Disponível em:
<https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB7164468.htm>.

Acesso em: 14 maio 2022.

PUBCHEM. **2,3,3-Trimethyl-1-hexene**. Disponível em:
<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/2_3_3-Trimethyl-1-hexene>. Acesso em: 14 maio 2022.

PUBCHEM. **4-Octen-3-one**. Disponível em:
<<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/4-Octen-3-one>>. Acesso em: 14 maio 2022.

oct-4-en-3-one CAS#: 14129-48-7. Disponível em:
<https://www.chemicalbook.com/ProductChemicalPropertiesCB61260548_EN.htm>. Acesso em: 14 maio 2022.

LUEBKE, W. **4-octen-3-one, 14129-48-7**. Disponível em:
<<http://www.perflavory.com/docs/doc1586051.html>>. Acesso em: 14 maio 2022.

PUBCHEM. **Cyclobutane, 1,3-diisopropenyl-, trans**. Disponível em:
<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Cyclobutane_-1_3-diisopropenyl_-_trans>. Acesso em: 14 maio 2022.

PUBCHEM. **alpha-Methylstyrene**. Disponível em:
<<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/alpha-Methylstyrene>>. Acesso em: 14 maio 2022.

LUEBKE, W. **alpha-methyl styrene, 98-83-9**. Disponível em:
<<http://www.perflavory.com/docs/doc1218481.html>>. Acesso em: 14 maio 2022.

LUEBKE, W. **para-menthatriene, 18368-95-1**. Disponível em:
<<http://www.perflavory.com/docs/doc1551761.html>>. Acesso em: 14 maio 2022.

PUBCHEM. **p-Mentha-1,3,8-triene**. Disponível em:
<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/p-Mentha-1_3_8-triene>. Acesso em: 14 maio 2022.

para-menthatriene, 18368-95-1. Disponível em:
<<http://www.thegoodscentscompany.com/data/rw1551761.html>>. Acesso em: 14 maio 2022.

para-menthatriene, 18368-95-1. Disponível em:
<<http://www.thegoodscentscompany.com/data/rw1551761.html>>. Acesso em: 14 maio 2022.

PUBCHEM. **D-Limonene**. Disponível em:
<<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/D-Limonene>>. Acesso em: 14 maio 2022.

D-limoneno (da Laranja). Disponível em: <<https://www.quinari.com.br/loja/d->

limoneno/>. Acesso em: 14 maio 2022.