

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

MARIA PAULA REGGIANE SILVEIRA

CO-PIRÓLISE DE BIOMASSA E POLIETILENO TEREFALATO (PET)
PARA A OBTENÇÃO DE CARVÃO CO-PIRÓLÍTICO

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO

2023

MARIA PAULA REGGIANE SILVEIRA

CO-PIRÓLISE DE BIOMASSA E POLIETILENO TEREFTALATO (PET)
PARA A OBTENÇÃO DE CARVÃO CO-PIRÓLÍTICO

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Florestal.

Orientador: Ananias Francisco Dias Júnior

Coorientador: Gabriela Fontes Mayrinck Cupertino

JERÔNIMO MONTEIRO

ESPÍRITO SANTO

2023

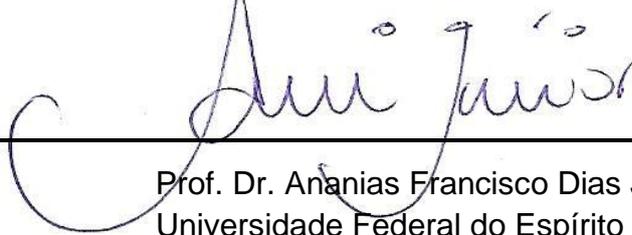
MARIA PAULA REGGIANE SILVEIRA

CO-PIRÓLISE DE BIOMASSA E POLIETILENO TEREFALATO (PET) PARA A
OBTENÇÃO DE CARVÃO CO-PIROLÍTICO

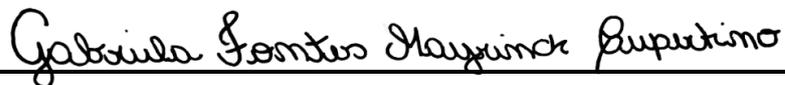
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Aprovado em: 08 de fevereiro de 2023.

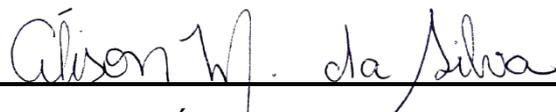
COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Ananias Francisco Dias Júnior
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador



MSc. Gabriela Fontes Mayrinck Cupertino
Universidade Federal do Espírito Santo
Conselheira



MSc. Álison Moreira da Silva
Universidade de São Paulo
Avaliador

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Paulo e Marilda por todo apoio, incentivo, amor e confiança ao longo desses anos que foram cruciais para me dar força para seguir em frente.

Às minhas irmãs Marina e Pauline por acreditarem que daria certo e sempre incentivarem o meu crescimento.

Às minhas amigas de república e faculdade, por todo apoio nos momentos que mais precisei e por se tornarem a minha segunda família.

À Gabriela Mayrinck pela amizade, parceria, conhecimentos e aprendizados repassados. Agradeço imensamente.

Ao professor Ananias que me deu grandes oportunidades, obrigada pela amizade e todo conhecimento e experiência repassado que foram cruciais na minha jornada.

Ao Álison e Fabíola, obrigado pelo apoio e ajuda ao longo desse estudo.

Ao grupo de pesquisa Bioenergia e Bioprodutos de Base Florestal - Ufes (BioEP).

A todos professores da Universidade Federal do Espírito Santo que contribuíram com meu crescimento.

Aos membros da banca examinadora.

Obrigada!

RESUMO

A co-pirólise de resíduos de biomassa e polietileno tereftalato (PET) pode ser uma estratégia para a reinserção de subprodutos energéticos no mercado, de forma a potencializar a gestão de resíduos sólidos e minimizar os impactos técnico-econômico e ambiental. É nessa perspectiva que o presente estudo visou caracterizar o carvão co-pirólítico proveniente da co-pirólise de biomassa e PET, avaliando seu potencial para fins energéticos. Realizou-se a co-pirólise de biomassa de eucalipto e material PET, obedecendo a proporção de 0 (0P5T), 15 (15P5T) e 25 (25P5T) % de adição de PET a biomassa de eucalipto com temperatura final de 450°C e taxa de aquecimento de 5°C.min⁻¹. Após a produção dos carvões, para avaliação frente às suas propriedades, foi realizada as análises físicas (densidade a granel, densidade aparente e porosidade), químicas (análise química imediata) e energéticas (poder calorífico superior, inferior e útil e densidade energética). Além disso, avaliou-se por meio do microscópio eletrônico de varredura (MEV) a estrutura do carvão co-pirólítico. A adição de PET proporcionou um aumento de 17% na densidade a granel do material (0P5T – 25P5T). Houve um aumento de 7,8% (0P5T – 25P5T) no poder calorífico superior, enquanto foi observado uma redução de 21% (0P5T – 25P5T) no percentual de cinzas do carvão co-pirólítico. Em síntese, observou-se que a adição do PET no processo de pirólise de *Eucalyptus* spp. é promissora para fins energéticos, já que foi observado que quanto maior a proporção de PET adicionada, maior o poder calorífico do material, maior a densidade energética, maior resistência mecânica e menor a porosidade, sendo potencial para fins energéticos.

Palavras chave: Resíduos plásticos; Bioenergia; Combustível sólido.

ABSTRACT

The co-pyrolysis of waste biomass and polyethylene terephthalate (PET) can be a strategy for the reinsertion of energy by-products in the market, in order to enhance the management of solid waste and minimize the technical, economic and environmental impacts. It is in this perspective that the present study aimed to characterize co-pyrolytic charcoal from the co-pyrolysis of biomass and PET, evaluating its potential for energy purposes. The co-pyrolysis of eucalyptus biomass and PET material was carried out, obeying the proportion of 0 (0P5T), 15 (15P5T) and 25 (25P5T) % of addition of PET to eucalyptus biomass with a final temperature of 450°C and heating rate of 5°C.min⁻¹. After the production of charcoals, to evaluate their properties, physical (bulk density, apparent density and porosity), chemical (immediate chemical analysis) and energy (higher, lower and useful calorific value and energy density) analyzes were carried out. In addition, the structure of the co-pyrolytic charcoal was evaluated using a scanning electron microscope (SEM). The addition of PET provided a 17% increase in the bulk density of the material (0P5T – 25P5T). There was an increase of 7.8% (0P5T – 25P5T) in the higher calorific value, while a reduction of 21% (0P5T – 25P5T) was observed in the percentage of co-pyrolytic charcoal ash. In summary, it was observed that the addition of PET in the pyrolysis process of *Eucalyptus* spp. is promising for energy purposes, since it was observed that the greater the proportion of PET added, the greater the calorific value of the material, the greater the energy density, the greater the mechanical resistance and the lower the porosity, potential for energy purposes.

Keywords: Plastic waste; Bioenergy; Solid fuel.

Sumário

LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	12
Objetivo Geral.....	12
Objetivos Específicos.....	12
3. REVISÃO DE LITERATURA	12
Resíduos sólidos: a problemática envolvendo materiais plásticos	12
A co-pirólise como alternativa para reaproveitamento de plásticos	13
4. METODOLOGIA	14
Obtenção e caracterização das matérias primas	14
Caracterização do carvão vegetal.....	15
Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	16
Análise dos dados	17
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	17
Rendimento dos produtos da co-pirólise de biomassa e PET	17
Caracterização físico-química do carvão vegetal	18
Propriedades energéticas do carvão vegetal	21
Microscopia eletrônica de varredura (MEV) do carvão vegetal	22
6. Conclusões	23
7. Referências bibliográficas	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Análise imediata das matérias primas envolvida no processo (biomassa e PET)	14
--	-----------

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Variação do rendimento de carvão vegetal, líquido pirolenhoso e gases não condensáveis em relação à proporção de PET. Em que CV = rendimento em carvão (%); LP = líquido pirolenhoso; e GNC = gases não condensáveis **17**
- Figura 2:** Variação da (A) = densidade à granel ($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3}$) e (B) = densidade aparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) **18**
- Figura 3:** Variação da porosidade em relação a diferentes proporções de PET **19**
- Figura 4:** Variação da porcentagem de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas em relação à proporção de PET. Em que MV = materiais voláteis, CF = carbono fixo e CZ = cinzas **20**
- Figura 5:** Propriedades energéticas do carvão co-pirólítico. Em que A = poder calorífico **21**
- Figura 7:** Imagens do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), de carvão produzido em diferentes proporções de biomassa e PET. Em que A = 0P5T; B =15P5T; C = 25P5T..... **22**

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional atrelado a intensa industrialização nas últimas décadas, resultaram em problemas de esgotamento de energia, contaminação do ar e maior geração de resíduos sólidos (JAHIRUL et al., 2012). As Organizações das Nações Unidas (ONU) em conjunto com o Banco mundial afirmam que na metade desse século a população mundial produzirá 4 bilhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) por ano. O descarte inadequado desse material provoca diversas consequências socioambientais, que afetam a qualidade do meio ambiente e a saúde da população. Com características versáteis e econômicas, os materiais plásticos são um dos principais constituintes dos resíduos sólidos urbanos do mundo e uma das principais matérias primas debatidas quando o assunto é meio ambiente. Estima-se que mundialmente são produzidos cerca de 300 milhões de toneladas de lixo plástico a cada ano, sendo apenas 9% reciclado (ONU, 2019). Ao longo da pandemia iniciada em 2020, o consumo de plástico aumentou drasticamente, principalmente pela necessidade da população de consumir equipamentos de proteção individual (EPI) e produtos via delivery, logo, uma grande problemática a ser resolvida, visto que apenas 1,28% é reciclado no Brasil (Fundação Heinrich Boll, 2021).

Dentre os inúmeros materiais plásticos existentes, o polietileno tereftalato (PET) está fortemente enraizado no mercado global, podendo ser usado para uma variedade de bens de consumo, como fibras sintéticas de poliéster, garrafas e filmes, setores de elétrica, construção e eletrônicos. Considerado um material de vida útil curta, o PET está presente no cotidiano da sociedade e para isso é necessário a produção em larga escala para atender essa demanda global. Tendo como referência o dado coletado de 2016, estima-se que a produção foi de 488 bilhões de materiais a base de PET no mundo (VOLANTI et al., 2019). Sem melhorias na infraestrutura de gestão de resíduos, prevê-se que a quantidade cumulativa de resíduos plásticos, como os classificados como PET, disponíveis para entrar no oceano vindos da terra aumente em uma ordem de magnitude até 2025 (JAMBECK et al., 2015). Ressalta-se que esse material não se acumula apenas nas praias em todo o mundo, mas também em ecossistemas remotos de oceano aberto, sendo responsável por causar mais de 80% de impacto na vida selvagem (BROWNE et al., 2015).

O grande problema ambiental dos resíduos plásticos está relacionado a sua resistência à biodegradação, como as suas principais propriedades são resistências mecânicas, térmicas e químicas fazem que permaneçam por anos no ambiente, conservando-se fisicamente (ROMÃO; SPINACÉ; DE PAOLI, 2009; AL-ENIZI, et al., 2020). A fim de mitigar os impactos causados, alternativas que buscam inovação e sustentabilidade são de grande importância para uma melhor destinação dessa matéria prima. Nesse contexto, o PET é composto basicamente de hidrocarbonetos e oxigênio, sendo bastante interessante para processos de degradação térmica (SEOK; TAE, 2019). Nessa perspectiva, diversos estudos estão focados na co-pirólise de plásticos e biomassa, a fim de investigar as características, rendimentos e propriedades do produto gerado (BERNARDO et al., 2009; OZSIN E PÜTÜN, 2017). O processo de co-pirólise é capaz de despolimerizar a biomassa, gerando produtos sólidos (carvão co-pirólítico) e líquidos (líquido pirolenhoso) de alto valor agregado (OZSIN; PÜTÜN, 2017).

Diferentes estudos têm investigado o processo de co-pirólise para obtenção de produtos líquidos (NEHA e REMYA, 2022; SEKYERE et al., 2023; GIN et al., 2021). Contudo, sabe-se pouco sobre os efeitos sinérgicos entre o plástico e a biomassa nas características do carvão co-pirólítico produzido (SAMAL et al., 2021). Com base nessas informações, as expectativas de se obter propriedades interessantes para o carvão vegetal oriundo de PET e biomassa são positivas. Amplamente estudada, a espécie de *Eucalyptus* spp. possui grande relevância no mercado mundial de florestas plantadas, sendo considerada uma importante fonte de biomassa para a produção de combustíveis, produtos químicos e materiais, apresentando benéficos industriais baseados nos seus principais componentes, lignina, celulose e hemicelulose (CARVALHO et al., 2012; PÉNIN et al., 2020). Nesse contexto, a fim de obter uma melhor destinação de PET e preencher algumas lacunas existentes quanto a influência da co-pirólise no produto sólido, o objetivo desse trabalho foi investigar as propriedades do carvão co-pirólítico produzido em diferentes proporções de biomassa e PET.

2. OBJETIVOS

Objetivo Geral

Investigar as propriedades do carvão co-pirólítico produzido em diferentes proporções de biomassa e PET.

Objetivos Específicos

- Analisar o rendimento do carvão co-pirólítico sobre as diferentes proporções de PET;
- Avaliar as propriedades físicas, químicas e energéticas do carvão co-pirólítico produzido;
- Avaliar as características morfológicas do carvão co-pirólítico produzido a partir de diferentes proporções de PET;
- Propor alternativas de utilização do carvão vegetal produzido para a geração de um bioproduto.

3. REVISÃO DE LITERATURA

Resíduos sólidos: a problemática envolvendo materiais plásticos

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) são considerados um dos principais poluentes ambientais da atualidade e, segundo o relatório do Banco Mundial, são produzidos anualmente em todo o mundo cerca de 2 bilhões de toneladas métricas de RSU. Estimativas mundiais indicam que cerca de 40% dos RSU não são gerenciados adequadamente (KAZA et al., 2018; ADEKOLA et al., 2021). Nesse contexto, os plásticos são o terceiro material de maior utilidade no mundo, tendo uma produção mundial de cerca de 350 milhões de toneladas (GILENO; TURCI, 2021; TAMBURINI et al., 2021). Dentre os materiais plásticos, o polietileno tereftalato (PET) é o mais usado no cotidiano, seja através de garrafas de água e refrigerantes ou em fibras sintéticas. Logo, visando o ano de 2016 no qual a produção foi cerca de 488 bilhões de toneladas a base de PET no mundo, gera-se uma preocupação quanto a sua forma de descarte e o seu impacto ao meio ambiente (VOLANTI et al., 2019).

A poluição ambiental e a grande perda de recursos provenientes do descarte de resíduos plásticos, têm se tornado desafios comuns em todo o mundo. Devido ao fato de o plástico levar cerca de 400 anos para degradar, supõe-se que materiais plásticos produzidos no período da sua invenção (1862) possam ainda estar presentes no meio

ambiente nos dias atuais. Assim, uma das metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) desenvolvidos pela Organização das Nações Unidas, é o manejo ambientalmente adequado dos resíduos, como os plásticos, minimizando os impactos negativos sobre o meio através da redução, reciclagem e reuso. Dessa forma, quando o RSU é tratado como oportunidade e aplica-se medidas que invertem essa tendência de descarte incorreto, há a geração de novos produtos a partir de resíduos (LINO et al., 2023). Nessa perspectiva, o uso de plásticos como matéria prima para geração de novos produtos, é uma oportunidade para o trazer de volta para a cadeia produtiva como matéria prima de maior valor agregado (ZHAI et al., 2023), visto que, nos últimos anos houve um aperfeiçoamento tecnológico em relação ao aproveitamento energético dos resíduos plásticos, garantindo uma produção sustentável e com potencial de substituir parte dos produtos de petróleo que ainda são usados recentemente, contribuindo também com o desenvolvimento econômico.

A co-pirólise como alternativa para reaproveitamento de plásticos

Uma alternativa amplamente estudada para aproveitamento dos resíduos plásticos é a pirólise (FAN et al., 2023; NAKAGAWA, et al., 2022; XAYACHAK, et al., 2022; GÓMEZ-HERNÁNDEZ et al., 2019). Considerada uma visão econômica e simples para a administração dos resíduos plásticos, a pirólise é uma das tecnologias de conversão termoquímica responsável pela decomposição de materiais na ausência total ou parcial de oxigênio, que possibilita a geração de produtos sólidos e líquidos (NIE et al., 2023). Logo, a pirólise pode exercer um papel de tecnologia eficiente e promissora para o gerenciamento de resíduos, já que ao utilizá-los na pirólise é possível reduzir substancialmente o volume de resíduos PET destinados a aterros necessários, economizando custos para realizar tratamento de resíduos, além de possibilitar a geração de produtos de valor agregado (ABNISA; WAN DAUD, 2014).

Além da pirólise, um método promissor que processa ao mesmo tempo a biomassa e o plástico, gerando produtos de alto valor agregado é a co-pirólise. A co-pirólise corresponde ao método de degradação térmica utilizando dois ou mais materiais dissemelhantes na carência total ou parcial de oxigênio, semelhante ao método de pirólise, gerando produtos líquidos (líquido pirolenhoso), sólidos (carvão) e gasosos (gases não condensáveis) (ABNISA; WAN DAUD, 2014; ZHOU et al., 2006). Estudos relatam que a decomposição do plástico e da biomassa acontecem entre 300 e 900°C, causando a quebra de grandes cadeias poliméricas em fragmentos menores, no qual

primeiramente o polímero é fundido e em seguida decomposto, possibilitando maiores reações sinérgicas entre as matérias primas envolvidas. (KARTIK, et al., 2022).

Portanto, visando obter maior aproveitamento dos plásticos, a co-pirólise é o método ideal para alcançar esse objetivo, visto que através desse processo é possível transformar o plástico e a biomassa em diversos subprodutos de qualidade e valor agregado, semelhantes aos combustíveis líquidos, petróleo bruto, carvão e gás (FAN et al., 2023; XAYACHAK et al., 2022). Esse processo impacta diretamente o rendimento, as propriedades físicas e a estrutura química, porém pouco se sabe sobre os parâmetros que influenciam o resultado dos produtos finais (carvão co-pirólítico, líquido pirolenhoso e gases não condensáveis) (AKANCHA; KUMARI; SINGH, 2019; CHATTOPADHYAY et al., 2016).

4. METODOLOGIA

Obtenção e caracterização das matérias primas

A biomassa utilizada foi madeiras provenientes de um plantio experimental de *Eucalyptus* spp., composto quimicamente de 30,41% de lignina total, 68,99% de holocelulose e 0,95% de extrativos. Já os plásticos utilizados, são provenientes de materiais pós consumo a base de PET (polietileno tereftalato), como garrafas de refrigerante e água, encontradas nas coletas de resíduos, os quais foram fragmentados em tamanho de 5 x 5cm com auxílio de uma tesoura. Tanto a biomassa quanto o PET foram caracterizados a fim de identificar a influência na composição do carvão vegetal obtido no experimento (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

Tabela 1: Análise imediata das matérias primas envolvida no processo (biomassa e PET)

Material	U (%)	MV (%)	C (%)	CF (%)	PCS (kcal kg ⁻¹)	PCI (kcal kg ⁻¹)	PCU (kcal kg ⁻¹)
PET	3,10	91,14	0,103	8,75	5743,05	5439,05	5232,46
Biomassa	8,25	85,50	0,398	14,09	4758,29	4454,29	4039,32

Em que: U = umidade; C = cinzas; MV = materiais voláteis; CF = carbono fixo; PCS = poder calorífico superior; PCI = poder calorífico inferior; PCU = poder calorífico útil.

Fonte: A autora.

Os procedimentos de pirólise seguiram as descrições de Dias Júnior et al. (2016). Dessa forma, as amostras previamente secas em estufa (103 ± 2 °C) foram

submetidas a ação do calor em um cilindro metálico (reator de leito fixo) no interior de um forno tipo mufla com taxa de aquecimento de $5,0 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, sob temperatura final de 450°C e mantida por 15 minutos. Tal procedimento utilizado por Dias Júnior (2016) possibilitou a obtenção de carvões co-pirólíticos com teores de carbono, poder calorífico e de porosidade distintos, aspectos relacionados à hipótese deste trabalho. A quantidade da mistura de PET e eucalipto usada em cada repetição é de 300 ± 10 g. Com o intuito de investigar a mistura de biomassa e PET, foram produzidas blendas obedecendo às proporções de 0% de PET e 100% de biomassa (P0T5), 15% de PET e 85% de biomassa (P15T5) e 25% de PET e 75% de biomassa (P25T5).

Os rendimentos gravimétricos em carvão, em líquido pirolenhoso e em gases não condensáveis, em relação as amostras secas foram determinadas de acordo com as equações (1, 2 e 3):

$$\text{RCV} = \left(\frac{M_{cv}}{M_m} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{RLP} = \left(\frac{M_{lp}}{M_m} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$\text{RGNC} = 100 - (\text{RCV} + \text{RLP}) \quad (3)$$

Em que: RCV = rendimento em carvão (%); M_{cv} = massa do carvão vegetal (g); M_m = massa seca da madeira (g); RLP = rendimento em líquido pirolenhoso (%); M_{lp} = massa do líquido pirolenhoso (g); RGNC = rendimento em gases não-condensáveis (%).

Caracterização do carvão vegetal

Os carvões produzidos foram caracterizados por meio da determinação da densidade aparente segundo o método hidrostático e das descrições da norma NBR 11941 (ABNT, 2003), feita pela divisão da massa pelo seu volume (D = massa de carvão co-pirólítico/volume, em $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$). De acordo com a metodologia D5057-17 (ASTM, 2017), realizou-se a medição da densidade a granel. A densidade verdadeira foi obtida seguindo a NBR 9165 (ABNT, 1985). Assim, calculou-se a porosidade a partir dos dados das densidades aparente e verdadeira, com auxílio da Equação 4.

$$P = \left(1 - \frac{D_B}{D_V} \right) \times 100 \quad (4)$$

Em que: P= Porosidade (%); DA= Densidade aparente do carvão vegetal (g cm^{-3}); DV= Densidade verdadeira (g cm^{-3}).

A umidade em base úmida se deu através da norma ASTM (2021) nos procedimentos descritos D1762-84. Para a avaliação do carvão co-pirólítico produzido, as amostras foram homogeneizadas em peneiras 40-60 mesh e secas em estufa a 103 ± 2 °C. A análise imediata deu-se conforme a norma D1762-84 (ASTM, 2021), para a determinação dos teores de materiais voláteis, de cinza e de carbono fixo. Em relação ao poder calorífico superior, a análise foi realizada em uma bomba calorimétrica do modelo Ika C200, obedecendo as instruções da EN14918 (DIN, 2010) e, assim, realizou-se a análise dos resultados de acordo com a NBR 8633 (ABNT, 1984). A transformação dos valores do PCS para Poder Calorífico Inferior (PCI) e Poder Calorífico Útil (PCU) seguiram as equações abaixo (5 e 6), proposta por DIN 14918 (2010), levando em consideração para o PCI o percentual de hidrogênio do material (6%) e o PCU considerando a umidade do material. Já para a obtenção da densidade energética do carvão produzido, considerou-se a densidade a granel e o PCU, através da multiplicação de seus resultados.

$$PCI = PCS - 600 * \left(\frac{9H}{100} \right) \quad (5)$$

$$PCU = PCI * (1 - U) - 600U \quad (6)$$

Em que: PCI= Poder Calorífico Inferior (kcal kg^{-1} ou J kg^{-1}); PCS= Poder Calorífico Superior (kcal kg^{-1} ou J kg^{-1}); H= teor de hidrogênio do material (%). PCU= Poder Calorífico Útil (kcal kg^{-1} ou J kg^{-1}); U= Umidade (%).

Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para a análise de micrografia eletrônica de varredura, as amostras de 60 mesh (0,250 mm) com fitas de carbono foram fixadas em suporte metálico e, em um sistema Balzers Union SCD 030, metalizadas com ouro. Em seguida, utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura JSM- IT200 (Tóquio, Japão), operando a 10Kv. Utilizando o software proprietário JEOL, foi possível obter imagens, com aproximação de x500, identificar os poros e medir os seus diâmetros.

Análise dos dados

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e de homocedasticidade (Bartlett). Realizou-se a análise de variância seguindo um delineamento inteiramente casualizado, compreendidos por uma variável independente relacionada à proporção de carvão co-pirólítico (0, 15 e 25% de PET), com 5 repetições para cada proporção estudada. Quando houve diferença significativa em pelo menos um dos tratamentos, modelos de regressão foram ajustados. Todas as análises foram executadas a 95% de probabilidade. Medidas de dispersão do desvio padrão foram fornecidas para melhor entender o intervalo de confiança obtido para cada variável estudada. O software R (R CORE TEAM, 2020) foi utilizado para todas as análises estatísticas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Rendimento dos produtos da co-pirólise de biomassa e PET

A Figura 1 mostra que a proporção de biomassa/polietileno tereftalato (PET), envolvidos no processo de co-pirólise, apresentaram influência significativa no rendimento dos produtos gerados.

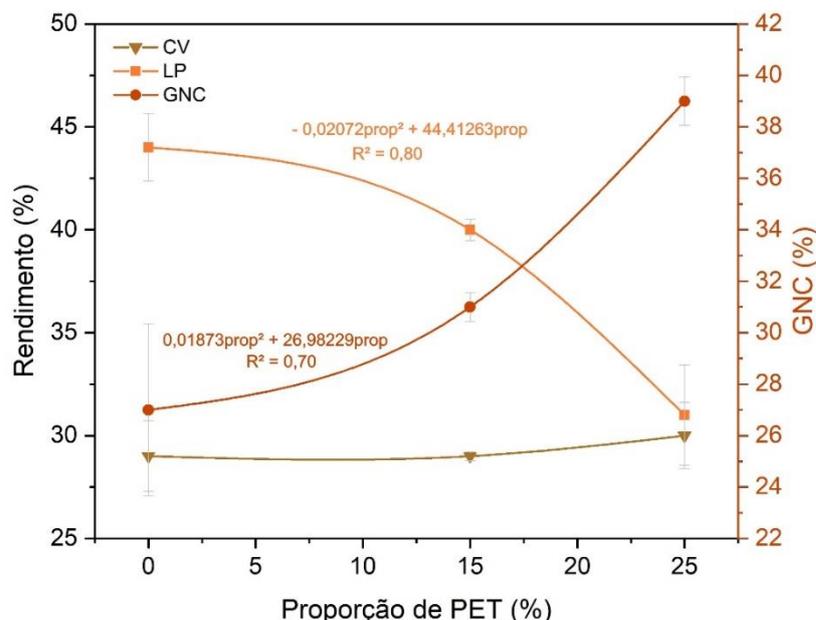


Figura 1: Variação do rendimento de carvão vegetal, líquido pirolenhoso e gases não condensáveis em relação à proporção de PET. Em que CV = rendimento em carvão (%); LP = líquido pirolenhoso; e GNC = gases não condensáveis.

Fonte: A autora.

O rendimento do carvão co-pirólítico não apresentou diferença significativa com a adição de PET (Figura 1). Em relação ao rendimento dos gases não condensáveis houve um aumento de 30% (0P5T – 25P5T) (Figura 1). Já o líquido pirolenhoso não teve a mesma reação de aumentar o rendimento, diminuiu o produto líquido em 29% (0P5T – 25P5T) (Figura 1). Estudos afirmam que o plástico gera intervenções sinérgicas e inibitórias na decomposição da biomassa, devido às influências dos radicais e o revestimento entre os produtos do processo também podem ter acarretado mudanças significativas dos rendimentos da co-pirólise, justificando os resultados do rendimento de líquido e gases (DOMINGUES et al., 2017; SAMAL et al., 2021). Os resultados sugerem que a adição do PET no rendimento de carvão co-pirólítico não inibiu a formação do mesmo, podendo essa ser uma vantagem no que tange o uso comercial da co-pirólise para obtenção do produto sólido em questão. Contudo, é preciso destacar que as características do carvão pode ser um diferencial, permitindo sua designação como produto energético, de purificação da água (carvão ativado), nutrição do solo (biochar) e uso em indústria química, viável ou não.

Caracterização físico-química do carvão vegetal

A Figura 2 mostra que a adição de PET proporcionou um incremento nas propriedades físicas (densidade a granel e densidade básica) do carvão co-pirólítico produzido.

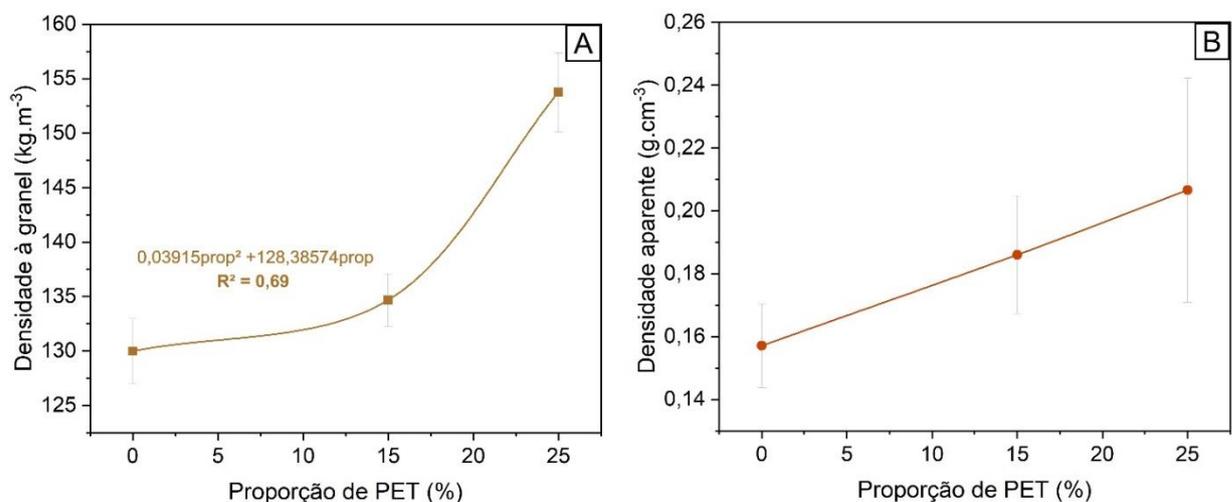


Figura 2: Variação da (A) = densidade à granel (kg.cm⁻³) e (B) = densidade aparente (g.cm⁻³).

Fonte: A autora.

Ao avaliar a densidade a granel, as maiores proporções de PET (25%) resultaram em um aumento de cerca de 17% (0P5T – 25P5T) (Figura 2), resultado semelhante ao encontrado por Samal et al. (2021). Esse comportamento é justificado pelo fato de que ocorre um aumento de massa resultante do revestimento dos poros pelo polímero PET (BERNARDO et al., 2012). Em relação a densidade aparente, no qual considera a ocupação dos poros internos pelo próprio elemento carvão, a adição do plástico teve uma influência pequena sobre essa variável (Figura 2). De maneira geral, a adição do PET é significativa para o incremento da variável densidade a granel, sendo que quanto maior a proporção de PET, maior a densidade a granel do carvão co-pirólítico produzido, sendo essa característica indicada para diversos fins, como por exemplo geração de energia para siderurgia, no qual utiliza o carvão vegetal para redução e uma produção com menor volume de carvão é muito benéfica.

Em relação a porosidade, a Figura 3 mostra que a adição de PET diminuiu em 11% o percentual de poros do carvão co-pirólítico (0P5T – 25P5T).

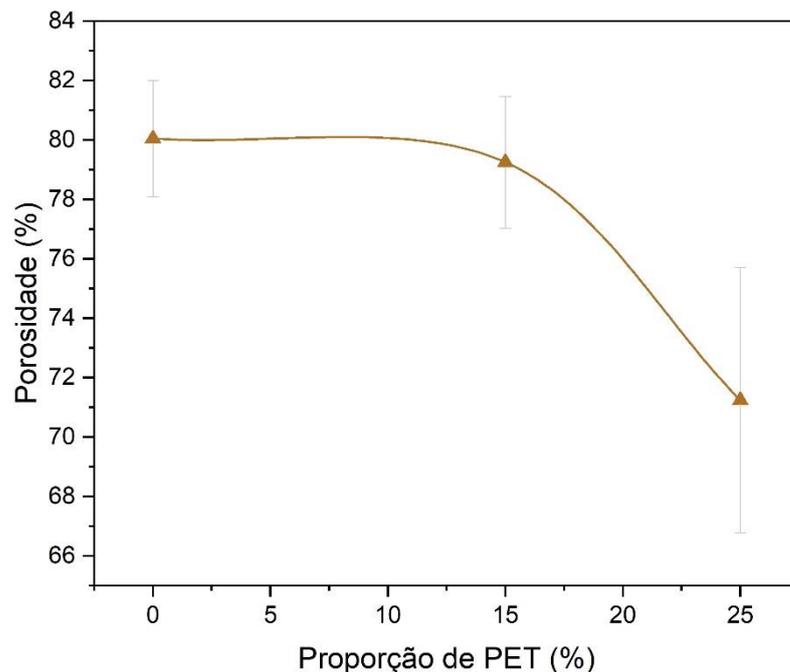


Figura 3: Variação da porosidade em relação a diferentes proporções de PET.

Fonte: A autora.

Nota-se que quanto maior a proporção de PET, menor o percentual de poros do carvão co-pirólítico produzido (Figura 3). Esse fato pode ser justificado pela impregnação do PET nos poros do carvão, possibilitando uma redução na porosidade

do material (SAMAL et al., 2021). Um carvão com maior porosidade tende a ter menor resistência mecânica, ou seja, de maneira geral a adição do PET contribui para uma melhor resistência do material (SURUP et al., 2020). Pensando em uso de carvão na siderurgia, maior resistência é de suma importância para uma melhor pré-redução do minério de ferro (RIVA et al., 2019), visto que gera menores teores de finos que consequentemente melhora a eficiência do termorreductor.

A Figura 4 mostra as características químicas do carvão co-pirólítico quando adicionado diferentes proporções (15 e 25%) de PET no processo de co-pirólise.

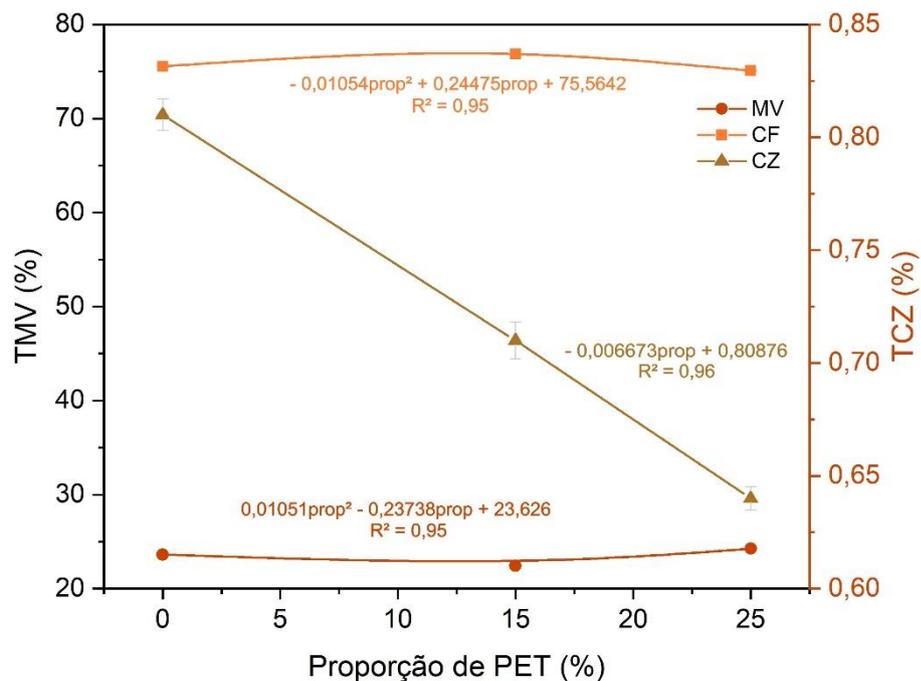


Figura 4: Variação da porcentagem de materiais voláteis (TMV), carbono fixo e cinzas (TCZ) em relação à proporção de PET. Em que MV = materiais voláteis, CF = carbono fixo e CZ = cinzas, prop = proporção.

Fonte: A autora.

Na avaliação química do carvão co-pirólítico, observa-se que a adição de PET proporcionou uma redução de cerca de 21% (0P5T – 25P5T) no conteúdo de cinzas do material (Figura 4), o que pode ser justificado pelo fato do PET ser um material de baixo teor de cinzas ao compará-lo com a biomassa (CUPERTINO, 2022). Destaca-se que esse desempenho de redução do teor de cinzas pode ser um caminho interessante para produção de energia, visto que as cinzas são desfavoráveis ao poder calorífico do material por ser um elemento inorgânico que não degrada (SAMAL et al., 2021) e após a combustão do carvão co-pirólítico, acumula no equipamento

utilizado gerando problemas de incrustamento, aumentando a necessidade de manutenções. Em relação aos materiais voláteis e carbono fixo, houve um aumento de 2,7% (0P5T – 25P5T) e 1,72% (0P5T – 15P5T), respectivamente, nestas propriedades (Figura 4). Esses resultados podem ser fundamentados pelo fato de que o arranjo do esqueleto interno, após a pirólise do revestimento plástico presente na superfície do carvão, mostrou um maior acúmulo de carbono fixo em relação aos materiais voláteis, indicando um comportamento favorável combustível, já que esse fato representa uma maior eficiência na combustão do material (SAMAL et al., 2021; SHARMA; SARMAH; DUBEY, 2020). Um combustível ideal é aquele que apresenta alto teor de carbono fixo e baixos teores de cinzas e materiais voláteis (MICHALAK et al., 2019), resultados similares encontrados nesse estudo.

Propriedades energéticas do carvão vegetal

A Figura 5 expõe o comportamento das propriedades energéticas (poder calorífico e densidade energética) frente a adição de PET no processo de co-pirólise.

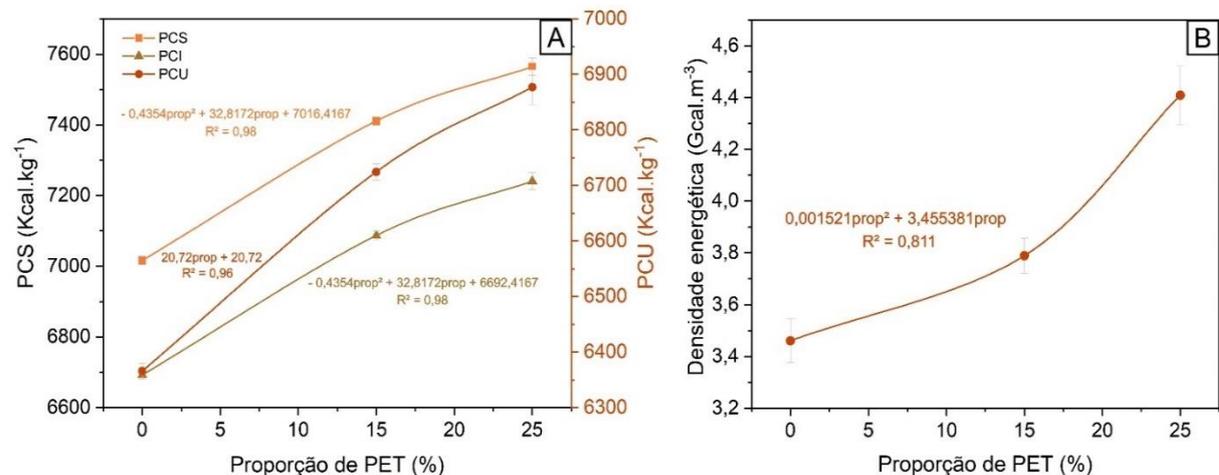


Figura 5: Propriedades energéticas do carvão co-pirólítico. Em que A = poder calorífico (onde, PCS= Poder calorífico superior, PCI = Poder calorífico inferior e PCU = Poder calorífico útil) e B= densidade energética.

Fonte: A autora.

A Figura 5 (A) mostra que o carvão co-pirólítico obteve um poder calorífico (superior, inferior e útil) mais eficiente em energia ao adicionar PET. Houve um aumento percentual de 7,8%, 8,19% e 8,03%, em relação ao poder calorífico superior, inferior e útil, respectivamente. Esse comportamento pode ser justificado pelo fato de aumentar a relação C/H e resultando em maiores proporções de ligações C=C que

possui alta energia de ligação (518 kJ.mol^{-1}) (LIU et al., 2013; SOARES et al., 2014). Tais ligações ao serem rompidas elevam o poder calorífico do material porque liberam energia (LIU et al., 2013; SOARES et al., 2014). Além de deixar o poder calorífico mais eficiente em queima, a adição de PET ocasionou uma ampliação na densidade energética em aproximadamente 27,39% (0P5T – 25P5T) (Figura 5 - B).

Em relação a aplicabilidade energética, um material que apresenta baixo teor de cinzas e alto poder calorífico, pode ser um bom combustível sólido (MICHALAK et al., 2019). Os resultados desse estudo mostram que a adição de PET gera um carvão co-pirólítico de boa qualidade para a siderurgia visto que houve o aumento do poder calorífico do material e reduziu o teor de cinzas, além de aumentar a densidade ao diminuir a porosidade.

Microscopia eletrônica de varredura (MEV) do carvão vegetal

É possível observar nas imagens da microscopia eletrônica de varredura (MEV) (Figura 6) a estrutura da superfície do carvão em distintas quantidades de PET adicionadas ao processo.

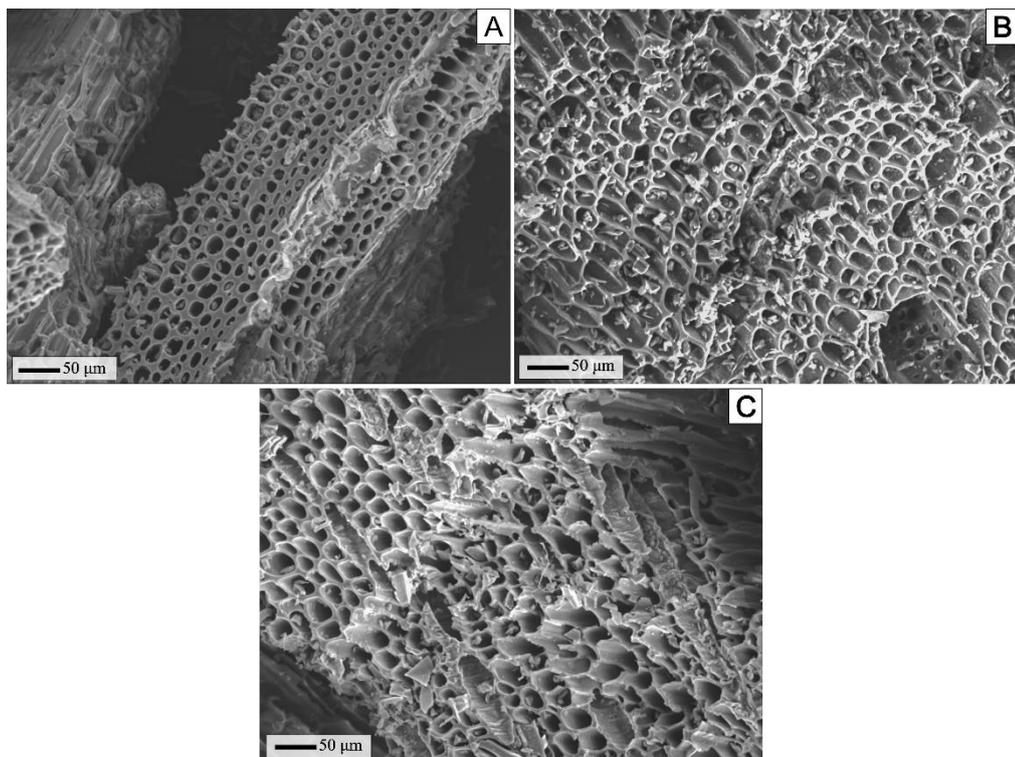


Figura 6: Imagens do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), de carvão produzido em diferentes proporções de biomassa e PET. Em que A = 0P5T; B = 15P5T; C = 25P5T.

Fonte: A autora.

De maneira geral, todos os parâmetros exibiram uma textura superficial irregular (Figura 6). Nota-se que o polímero PET adicionado na co-pirólise de biomassa causou alterações no arranjo estrutural do carvão produzido, visto que a superfície passou a ser revestida por pequenas partículas ou até mesmo ocupando os poros do carvão (Figura 6. B e C). Dessa forma, nota-se que ainda há permanência dos hidrocarbonetos com cadeias longas na superfície da biomassa após a co-pirólise. Esse fato é interessante pois a presença desses elementos pode acarretar o aumento dos teores de hidrogênio e carbono no carvão, logo, o PCS eleva e gera um desempenho energético adequado.

Ressalta-se que nos últimos anos, extensas pesquisas sobre resíduos sólidos vem sendo cada vez mais pontuadas, requerendo maior atenção para promover ampla aplicação em pesquisas futuras. Portanto, otimizar as características do carvão para sua utilidade como combustível sólido poderia melhorar a viabilidade econômica e ambiental do processo de co-pirólise, ao mesmo tempo que fomenta as ideias de gestão sustentável de resíduos e recuperação de recursos.

6. Conclusões

A adição de PET à pirólise de biomassa proporcionou características químicas benéficas à qualidade do carvão vegetal: o baixo teor de cinzas, alto teor de carbono fixo e maior poder calorífico do carvão co-pirólítico promove a utilidade para fins energéticos. Esses resultados indicam que o carvão co-pirólítico de biomassa e PET é uma estratégia para reaproveitamento de resíduos plásticos e geração de produto energético para diversos fins.

7. Referências bibliográficas

ABNISA, F.; WAN DAUD, W. M. A. A review on co-pyrolysis of biomass: An optional technique to obtain a high-grade pyrolysis oil. **Energy Conversion and Management**, v. 87, p. 71–85, 1 nov. 2014.

ADEKOLA, P. O.; IYALOMHE, F. O.; PACZOSKI, A.; ABEBE, S. T.; PAWŁOWSKA, B.; BAŃK, M.; CIRELLA, G. T. Public perception and awareness of waste management from Benin City. **Scientific Reports** 2021 11:1, v. 11, n. 1, p. 1–14, 11 jan. 2021.

AKANCHA; KUMARI, N.; SINGH, R. K. Co-pyrolysis of waste polypropylene and rice bran wax– production of biofuel and its characterization. **Journal of the Energy Institute**, v. 92, n. 4, p. 933–946, 1 ago. 2019.

AL-ENIZI, A. M.; UBAIDULLAH, M.; AHMED, J.; AHAMA, T.; AHMAD, T.; SHAIK, S.; NAUSHAD, M. Synthesis of NiOx@NPC composite for high-performance super capacitor via waste PET plastic derived Ni-MOF. **Composites Part B: Engineering**, v. 183, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1762-84**: standard method for chemical analyses of wood charcoal. Philadelphia, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9165**: determinação da densidade relativa aparente, relativa verdadeira e porosidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1985. 8 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **D5057-17**. Standard Test Method for Screening Apparent Specific Gravity and Bulk Density of Waste, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11941**: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

BERNARDO, M.; LAPA, N.; GONÇALVES, M.; MENDES, B.; PINTO, F. Study of the Organic Extraction and Acidic Leaching of Chars Obtained in the Pyrolysis of Plastics, Tire Rubber and Forestry Biomass Wastes. **Procedia Engineering**. Portugal. 2012, v. 42, p. 1739-1746. Ago. 2012.

BERNARDO, M. S.; LAPA, N.; BARBOSA, R.; GONÇALVES, M.; MENDES, B.; PINTO, F.; GULYURTLU, I. Chemical and Eco toxicological characterization of residues used during a co-pyrolysis of plastics and pine biomass. **Journal of Hazardous Materials**, v. 166, n. 1, p. 309-317, 2009.

BROWNE, M. A.; CHAPMAN, M. G.; THOMPSON, R. C.; ZETTLER, L. A. A.; JAMBECK, J.; MALLOS, N. J. Spatial and temporal patterns of stranded intertidal marine debris: is there a picture of global change? **Environmental Science & Technology**, v. 49, p. 7082-7094, 2015.

CARVALHO, M. D. P.; MENDONÇA, V. Z. D.; PEREIRA, F. C. B. L.; ARF, M. V.; KAPPES, C.; DALCHIAVON, F. C. Produtividade de madeira do eucalipto

correlacionada com atributos do solo visando ao mapeamento de zonas específicas de manejo. **Ciência Rural**, v. 42, n. 10, p. 1797-1803, 2012.

CHATTOPADHYAY, J.; PATHAK, T. S.; SRIVASTAVA, R.; SINGH, A. C. Catalytic copyrolysis of paper biomass and plastic mixtures (HDPE (high density polyethylene), PP (polypropylene) and PET (polyethylene terephthalate)) and product analysis. *Energy*, v. 103, p. 513–521, maio 2016.

CUPERTINO, G. F. M. **Co-pyrolysis of biomass and polyethylene terephthalate (PET) is an alternative to produce chemical and energy products**. 2022. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Ciências Florestais, Ufes, Jerônimo Monteiro, 2022.

DIAS JÚNIOR, A. F.; PIROLA, L. P.; TAKESHYTA, S.; LANA, A. Q.; BRITO, J. O.; ANDRADE, A. M. Hígroscopicity of charcoal produced in different temperatures. **Cerne**, v. 22, n. 4, p. 423-430, 2016.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 14918: Determination of calorific value**. Berlim: CEN: 63 p., 2010.

DOMINGUES, R. R.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, C. A.; DE MELO, I. C. N. A.; MELO, L. C. A.; MAGRIOTIS, Z. M.; SÁNCHEZ-MONEDERO, M. A. Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. **PLOS ONE**, v. 12, n. 5, p. e0176884, 1 maio 2017.

FAN, S.; ZHANG, Y.; CUI, L.; MAQSOOD, T.; NIZETIC, S. Cleaner production of aviation oil from microwave-assisted pyrolysis of plastic wastes. **Journal of Cleaner Production**. 2023, v. 390. Março 2023.

Fundação Heinrich Boll. **Atlas do plástico: fatos e números sobre o mundo dos polímeros sintéticos**. 2021. Disponível em: <https://br.boell.org/pt-br/atlasdoplastico>. Acesso em: 25/11/2022.

GILENO, L. A.; TURCI, L. F. R. Life cycle assessment for PET-bottle recycling in Brazil: B2B and B2F routes. *Cleaner Environmental Systems*, v. 3, p. 100057, 1 dez. 2021.

GIN, A. W.; HASSAN, H.; AHMAD, M. A.; HAMEED, B. H.; MOHD DIN, A. T. Recent progress on catalytic co-pyrolysis of plastic waste and lignocellulosic biomass to liquid fuel: The influence of technical and reaction kinetic parameters. **Arabian Journal of Chemistry**. Malásia, 2021, v. 14, 4 ed. Abril 2021.

GOMEZ-HERNANDEZ, R.; PANECATL-BERNAL, Y.; MENDEZ-ROJAS, M. A. High yield and simple one-step production of carbon black nanoparticles from waste tires. **Heliyon**. México, 2019, v. 5, 7 ed. Júlio 2019.

JAHIRUL, M.; RASUL, M.; CHOWDHURY, A.; ASHWATH, N. Produção de biocombustíveis por pirólise de biomassa - uma revisão tecnológica. **Energies**, v. 5, n. 12, p. 4952-5001, 2012.

JAMBECK, J. R.; GEYER, R.; WILCOX, C.; SIEGLER, T. R.; PERRYMAN, M.; ANDRADY, A., NARAYAN, R.; LAW, K. L. Plastic waste inputs from land into the ocean. **Science**, v. 347, p. 768-771, 2015.

KARTIK, S.; BALSORA, H. K.; SHARMA, M.; SAPTORO, A.; JAIN, R. K.; JOSHI, J. B.; SHARMA, A. Valorization of plastic wastes for production of fuels and value-added chemicals through pyrolysis – A review. **Thermal Science and Engineering Progress**. 2022, v. 32. Júlio 2022.

KAZA, S.; YAO, L. C.; BHADA-TATA, P.; VAN WOERDEN, F. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. **Urban Development**, 20 set. 2018. Disponível em: <<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>>. Acesso em: 26 maio 2022.

LINO, Y.; PRANJAL, K.; PRIYANSH, S.; JAGATH, C.; UDAYASHANKAR, H. N.; BABU, D. S. S.; BALAKRISHNA, K. Submarine Groundwater Discharge (SGD): Impacts, challenges, limitations, and management recommendations. **Groundwater for Sustainable Development**. Índia, 2023, v. 21. Maio 2023.

LIU, Z.; QUEK, A.; KENT HOEKMAN, S.; BALASUBRAMANIAN, R. Production of solid biochar fuel from waste biomass by hydrothermal carbonization. **Fuel**, v. 103, p. 943–949, 1 jan. 2013.

MICHALAK, I.; BAŚLADYŃSKA, S.; MOKRZYCKI, J.; RUTKOWSKI, P. Biochar from A Freshwater Macroalga as A Potential Biosorbent for Wastewater Treatment. **Water** 2019, Vol. 11, Page 1390, v. 11, n. 7, p. 1390, 6 jul. 2019.

NAKAGAWA, T.; SEUNGHYUN, K.; SLAUGHTER, C.; ABDULLAH, T.; HOUSER, G.; SALVIATO, M. Effects of aging on the mechanical and fracture properties of chopped fiber composites made from repurposed aerospace prepreg scrap and waste. **Sustainable Materials and Technologies**. Estados Unidos, 2022, v. 33. Set. 2023.

NEHA, S.; REMYA, N. Co-production of biooil and biochar from microwave co-pyrolysis of food-waste and plastic using recycled biochar as microwave susceptor. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**. Índia, 2022, v. 54. Dez. 2022.

NIE, N.; WANG, Y.; YELLEZUOME, D.; LIU, X.; WANG, P.; WANG, X.; ZHU, C.; XIAO, J.; CAI, J. Exploring kinetic and thermodynamic mechanisms of switchgrass pyrolysis using iterative linear integral isoconversional method and master plots approach. **Fuel**. China, 2023, v. 338. Abril 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Meio Ambiente aponta lacunas na reciclagem global de plástico**. 2019. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/82048-onu-meio-ambiente-aponta-lacun-na-reciclagem-global-de-plastico>>. Acesso em: 15 out. 2022.

ÖZSIN, G.; PÜTÜN, A. E. Insights into pyrolysis and co-pyrolysis of biomass and polystyrene: Thermochemical behaviors, kinetics and evolved gas analysis. **Energy Conversion and Management**, v. 149, p. 675–685, 1 out. 2017.

PÉNIN, L.; LÓPEZ, M.; SANTOS, V.; ALONSO, J. L.; PARAJÓ, J. C. Technologies for Eucalyptus wood processing in the scope of biorefineries: a comprehensive review. **Bioresource Technology**, 2020.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**. Vienna, Austria. 2020.

RIVA, L.; SURUP, G. R.; BUO, T. V.; NIELSEN, H. K. A study of densified biochar as carbon source in the silicon and ferrosilicon production. **Energy**. Noruega. 2019, v.181, p. 985-996. Ago. 2019.

ROMÃO, W.; SPINACÉ, M. A.; DE PAOLI, M. A. Poli (tereftalato de etileno), PET: Uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 19, n. 2, p. 121-132, 2009.

SAMAL, B.; VANAPALLI, K. R.; DUBEY, B. K.; BHATTACHARYA, J.; CHANDRA, S.; MEDHA, I. Influence of process parameters on thermal characteristics of char from co-pyrolysis of eucalyptus biomass and polystyrene: Its prospects as a solid fuel. **Energy**, v. 232, p. 121050, 1 out. 2021.

SEKYERE, D. T.; ZHANG, J.; CHEN, Y. HUANG, Y.; WANG, M.; WANG, J.; NIWAMANYA, N.; BARIGYE, A.; TIAN, Y. Production of light olefins and aromatics via catalytic co-pyrolysis of biomass and plastic. **Fuel**. China, 2023, v. 333. Fev. 2023.

SEOK, Y. O.; TAE, C. S. Upgrading biochar via co-paralysation of agricultural biomass and polyethylene terephthalate wastes. **RSC Adv.**, v. 9, p. 28284-28290, 2019.

SHARMA, H. B.; SARMAH, A. K.; DUBEY, B. Hydrothermal carbonization of renewable waste biomass for solid biofuel production: A discussion on process mechanism, the influence of process parameters, environmental performance and fuel properties of hydrochar. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 123, p. 109761, 1 maio 2020.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A.; HÖFLER, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 38, n. 3, p. 543–549, 2014.

SURUP, G. R.; NIELSEN, H. K.; GROBARTH, M.; DEIKE, R.; BULCKE, J. V.; KIBLEUR, P.; MULLER, M.; ZIEGNER, M.; YAZHENSKIKH, E.; BELOSHAPKIN, S.; LEAHY, J. J.; TRUBETSAKAYA, A. Effect of operating conditions and feedstock composition on the properties of manganese oxide or quartz charcoal pellets for the use in ferroalloy industries. **Energy**. 2020, v. 193. Fev. 2020.

TAMBURINI, E.; COSTA, S.; SUMMA, D.; BATTISTELLA, L.; FANO, E. A.; CASTALDELLI, G. Plastic (PET) vs bioplastic (PLA) or refillable aluminium bottles – What is the most sustainable choice for drinking water? A life-cycle (LCA) analysis. **Environmental Research**, v. 196, p. 110974, 1 maio 2021.

VOLANTI, M.; CESPI, D.; PASSARINI, F.; NERI, E.; CAVANI, F.; MIZSEY, P.; FOZER, D. Terephthalic acid from renewable sources: early-stage sustainability analysis of a bio-PET precursor. **Green Chemistry**, v. 21, p. 885-896, 2019.

XAYACHAK, T.; HAQUE, N.; PARTHASARATHY, R.; KING, S.; EMAMI, N.; LAU, D.; PRAMANIK, B. K. Pyrolysis for plastic waste management: An engineering perspective. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. Austrália, 2022, v. 10, 6 ed. Dez. 2022.

ZHAI, J.; SUN, Y.; ZHANG, Q.; QUIN, X. Research on mechanical characteristics of bulge formed joint based on plastic strain energy density. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**. China, 2023, v. 202. Abril 2023.

ZHOU, L.; WANG, Y.; HUANG, Q.; CAI, J. Thermogravimetric characteristics and kinetic of plastic and biomass blends co-pyrolysis. **Fuel Processing Technology**, v. 87, n. 11, p. 963–969, 1 nov. 2006.