

PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO PARA CONVERSÃO DE RESÍDUOS VIA PIRÓLISE E (CO)PIRÓLISE

Andrezza C. Silva[1]; Victória L. P. Moreira[1]; Alessandra da R. D. Monteiro[1]

[1] UFF- Universidade Federal Fluminense
andrezzacosta@id.uff.br

Palavras-Chave: Reciclagem Química, Padronização experimental, Sustentabilidade

Introdução

O crescimento populacional e a intensificação das atividades industriais têm ampliado a demanda por recursos e energia e, paralelamente, a geração de resíduos. No Brasil, a geração de resíduos sólidos urbanos atingiu aproximadamente 81,6 milhões de toneladas em 2024, enquanto a produção mundial de plásticos foi estimada em 430,9 milhões de toneladas no mesmo ano, evidenciando a necessidade de estratégias capazes de ampliar o aproveitamento desses materiais e reduzir sua destinação inadequada (ABREMA, 2025; PLASTICS EUROPE, 2025). Entre os resíduos de maior interesse encontram-se os materiais plásticos e as biomassas residuais, que podem ser reinseridos em cadeias produtivas por meio de rotas de valorização e reciclagem.

Nesse contexto, a pirólise apresenta-se como uma alternativa de reciclagem química e conversão termoquímica de resíduos. O processo ocorre por meio da decomposição térmica dos materiais em atmosfera com ausência ou baixa disponibilidade de oxigênio, promovendo a ruptura de estruturas macromoleculares e a formação de frações sólida, líquida e gasosa com potencial de aproveitamento energético e industrial (MONTEIRO, 2018; DAI et al., 2022). A tecnologia pode ser aplicada tanto a resíduos de biomassa quanto a materiais poliméricos, como polietileno, polipropileno, poliestireno e PET. Além disso, estudos recentes têm destacado a co-pirólise de biomassa e plásticos devido à possibilidade de interações entre as matérias-primas e à obtenção de produtos com características distintas daquelas observadas nos processos individuais (ENGAMBA ESSO et al., 2022; NAWAZ; RAZZAK, 2024).

Embora a reação de pirólise seja frequentemente descrita a partir de parâmetros como temperatura, taxa de aquecimento, tempo de residência e atmosfera reacional, sua execução experimental envolve um conjunto mais amplo de etapas. O preparo e a caracterização da carga, a montagem e a verificação da unidade, a inertização do sistema, o acompanhamento da reação, o resfriamento, a desmontagem, a coleta e o armazenamento dos produtos, a limpeza dos componentes e o registro das condições operacionais influenciam diretamente a segurança, a rastreabilidade e a reprodutibilidade dos ensaios. Em unidades de pesquisa, a sistematização dessas atividades é particularmente importante, pois reduz variações decorrentes da operação por diferentes usuários e facilita o treinamento de novos integrantes.

No Laboratório Interdisciplinar de Soluções Ambientais da Universidade Federal Fluminense (LISA-UFF), a unidade de pirólise já se encontrava instalada e operacional, porém ainda não havia uma rota metodológica consolidada que reunisse, de forma padronizada, todas as etapas necessárias à realização dos ensaios. Diante dessa necessidade, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver e organizar um Procedimento Operacional Padrão (POP) para a conversão de resíduos via pirólise e co-pirólise na unidade do LISA-UFF. A elaboração do documento foi fundamentada no acompanhamento de experimentos previamente realizados no laboratório, na participação direta nas etapas de preparação e operação da unidade, na realização de um ensaio de co-pirólise de resíduo de casca de coco e polietileno e na consulta a procedimentos e referências da literatura. O POP busca, assim, estabelecer uma sequência operacional clara e segura, contribuir para a padronização e a reprodutibilidade dos experimentos e servir como material de apoio para treinamento e futuras atualizações da unidade.

Material e Métodos

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório Interdisciplinar de Soluções Ambientais da Universidade Federal Fluminense (LISA-UFF) e compreendeu duas etapas principais: o desenvolvimento da rota metodológica com a elaboração do Procedimento Operacional Padrão (POP) da unidade de pirólise e a realização do procedimento em um ensaio de co-pirólise.

A elaboração do POP foi baseada no acompanhamento de ensaios previamente realizados no laboratório, na participação direta nas etapas de preparação e operação da unidade, na realização do experimento de co-pirólise e na consulta a procedimentos empregados em trabalhos anteriores e à literatura. A partir dessas informações, foram mapeadas e organizadas as etapas de preparo e caracterização da carga, verificação dos equipamentos, montagem da unidade, inertização do sistema, programação das condições operacionais, realização da reação, resfriamento, desmontagem, coleta e armazenamento dos produtos, limpeza dos componentes e registro das informações experimentais. Também foram identificados pontos críticos relacionados à segurança e à rastreabilidade dos ensaios, posteriormente incorporados ao documento.

Para aplicação da rota desenvolvida, foi realizado um ensaio de co pirólise com uma mistura contendo 50% de resíduo de casca de coco e 50% de polietileno virgem, em proporção mássica. O resíduo de coco foi triturado e submetido à secagem em estufa por 24 h, enquanto o polietileno, fornecido pela Braskem em forma granulada, foi separado e pesado. A massa total empregada foi de 30,105 g, sendo 15,095 g de coco seco e 15,010 g de polietileno, posteriormente homogeneizados e posicionados na região central do reator.

O ensaio foi conduzido em reator de quartzo em batelada, com 78 cm de comprimento total, 68 cm de comprimento útil e capacidade aproximada de 1080 cm^3, inserido em forno Carbolite Aston Lane, Hope Sheffield, S30 2RR. A unidade foi inertizada com nitrogênio proveniente de cilindro a 200 bar, com fluxo mantido durante todo o experimento. O forno foi programado para atingir 500 °C, permanecendo nessa temperatura por 60 min. Ao final da reação, o aquecimento foi interrompido e, após o resfriamento até temperatura segura para

manuseio, a unidade foi desmontada. As frações sólidas e oleosas obtidas na co pirólise foram coletadas, identificadas, pesadas e armazenadas para análises posteriores.

Resultados e Discussão

O acompanhamento dos experimentos realizados na unidade de pirólise permitiu identificar e organizar as principais etapas necessárias à execução dos ensaios. A sistematização evidenciou que a operação da unidade não se restringe à etapa de aquecimento da carga, mas envolve um conjunto de procedimentos anteriores, simultâneos e posteriores à reação. Foram estabelecidas etapas de preparo e caracterização da matéria-prima, verificação dos equipamentos, montagem da unidade, inertização do sistema, definição das condições operacionais, realização da reação, resfriamento, desmontagem, coleta e armazenamento dos produtos e limpeza dos componentes, conforme apresentado na Figura 1.

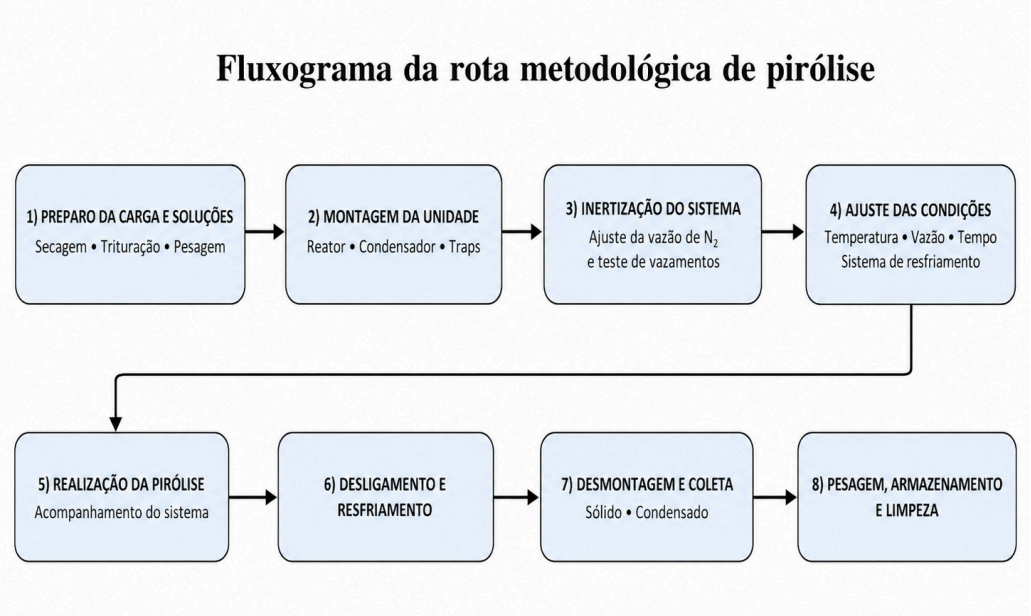


Figura 1 – Fluxograma resumido da rota metodológica de pirólise e co pirólise estabelecida para a unidade do LISA-UFF.

Durante o mapeamento da rota, também foram identificadas informações que devem ser registradas de maneira padronizada, incluindo massa e composição da carga, temperatura final, taxa de aquecimento, vazão de nitrogênio, tempo de permanência, temperatura de desmontagem e massas das frações recuperadas. Esses registros são importantes para a rastreabilidade dos ensaios e para a comparação entre experimentos realizados sob diferentes condições. Além disso, foram reconhecidos pontos críticos relacionados à segurança e à confiabilidade da operação, como a verificação da vedação das conexões antes do aquecimento, a circulação adequada do fluido de resfriamento, o estabelecimento de atmosfera inerte, o acompanhamento da temperatura e o resfriamento do sistema antes da desmontagem. A Figura 2 apresenta de maneira resumida os cuidados de segurança que se aplicam a todas as fases do experimento, complementando o fluxo do processo. Os detalhes completos de cada item estão no texto do POP.

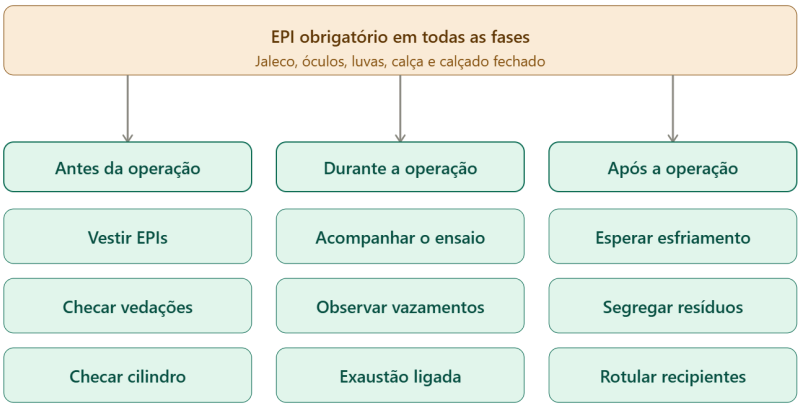
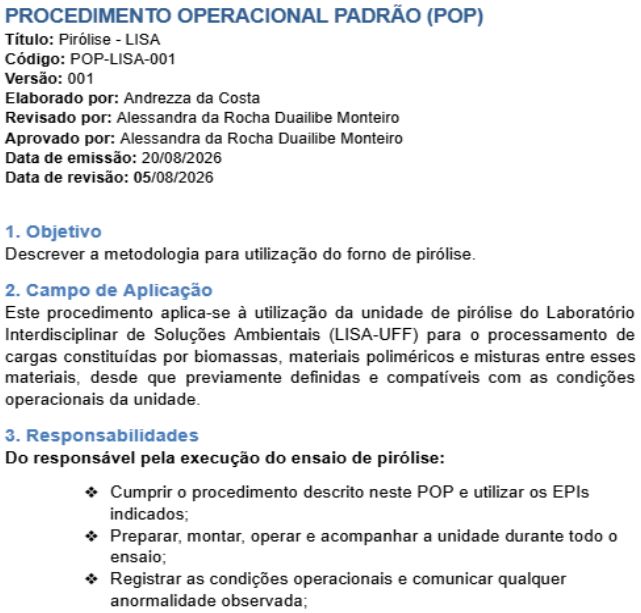


Figura 2 – Cuidados de segurança aplicados a todas as fases do experimento

A partir da organização dessas informações, foi elaborado o Procedimento Operacional Padrão (POP) da unidade de pirólise do LISA-UFF. O documento reúne as etapas de preparação, montagem, operação, finalização e limpeza, além de procedimentos de segurança e registro das informações experimentais. Sua elaboração contribui para reduzir variações associadas à execução dos ensaios por diferentes operadores, favorecendo a padronização, a reprodutibilidade e a segurança das atividades. Adicionalmente, o POP pode ser empregado como material de apoio no treinamento de novos integrantes do laboratório e atualizado à medida que novas matérias-primas, equipamentos ou condições operacionais sejam incorporados à unidade. A Figura 3 apresenta uma imagem da primeira página do POP elaborado.



PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO (POP)

Título: Pirólise - LISA
Código: POP-LISA-001
Versão: 001
Elaborado por: Andrezza da Costa
Revisado por: Alessandra da Rocha Duailibe Monteiro
Aprovado por: Alessandra da Rocha Duailibe Monteiro
Data de emissão: 20/08/2026
Data de revisão: 05/08/2026

1. Objetivo

Descrever a metodologia para utilização do forno de pirólise.

2. Campo de Aplicação

Este procedimento aplica-se à utilização da unidade de pirólise do Laboratório Interdisciplinar de Soluções Ambientais (LISA-UFF) para o processamento de cargas constituídas por biomassas, materiais poliméricos e misturas entre esses materiais, desde que previamente definidas e compatíveis com as condições operacionais da unidade.

3. Responsabilidades

Do responsável pela execução do ensaio de pirólise:

- Cumprir o procedimento descrito neste POP e utilizar os EPIs indicados;
- Preparar, montar, operar e acompanhar a unidade durante todo o ensaio;
- Registrar as condições operacionais e comunicar qualquer anormalidade observada;

Figura 3 – Imagem do Procedimento Operacional Padrão desenvolvido para a unidade de pirólise do LISA-UFF.

Como aplicação da rota metodológica estabelecida, foi realizada a co pirólise de uma mistura contendo 50% de resíduo de casca de coco e 50% de polietileno virgem, a 500 °C. O ensaio permitiu verificar a aplicabilidade da sequência operacional proposta ao processamento conjunto de uma biomassa lignocelulósica e de um material polimérico. Após a reação, foram recuperadas uma fração sólida, denominada biochar (figura 4 (a)), uma fração condensada com aspecto de cera e uma fração condensada oleosa (figura 4 (b)). A formação de diferentes frações está de acordo com o comportamento esperado em processos de pirólise, nos quais a composição da matéria-prima e as condições operacionais influenciam a distribuição e as características dos produtos obtidos (DAI et al., 2022).



(a) (b)

Figura 4 – (a) Biochar da Pirólise; (b) Fração condensada aspecto de cera e fração condensada oleosa no fundo do béquer

A análise termogravimétrica do biochar obtido na co pirólise, realizada no equipamento Shimadzu DTG 60 A no laboratório de pesquisa e pós-graduação RECAT, do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal Fluminense, apresentou diferentes etapas de perda de massa. Em temperaturas inferiores a aproximadamente 150 °C, foi observada redução de cerca de 7,9%, associada principalmente à eliminação de umidade e espécies voláteis remanescentes. Entre 150 e 380 °C, a perda foi de apenas 0,6%, indicando baixa presença de componentes facilmente degradáveis nessa faixa, comportamento coerente com a conversão térmica previamente sofrida pelo material durante a reação a 500 °C. Entre 380 e 520 °C ocorreu perda adicional de 14,2%, atribuída à decomposição de espécies orgânicas termicamente menos estáveis ainda presentes no sólido.

A perda de massa mais significativa ocorreu entre aproximadamente 520 e 700 °C, correspondendo a cerca de 56,0% da massa inicial. Considerando a mudança da atmosfera de análise de N_2 para O_2, esse evento é compatível com a oxidação da fração carbonácea residual formada durante a co pirólise. Ao final do ensaio permaneceu aproximadamente 9,6% da massa inicial, fração que pode ser associada predominantemente ao conteúdo inorgânico e às cinzas do material. O perfil observado indica, portanto, a presença expressiva de matéria carbonácea no produto sólido, comportamento esperado para materiais previamente submetidos à conversão termoquímica. A Figura 5 apresenta o perfil da análise termogravimétrica.

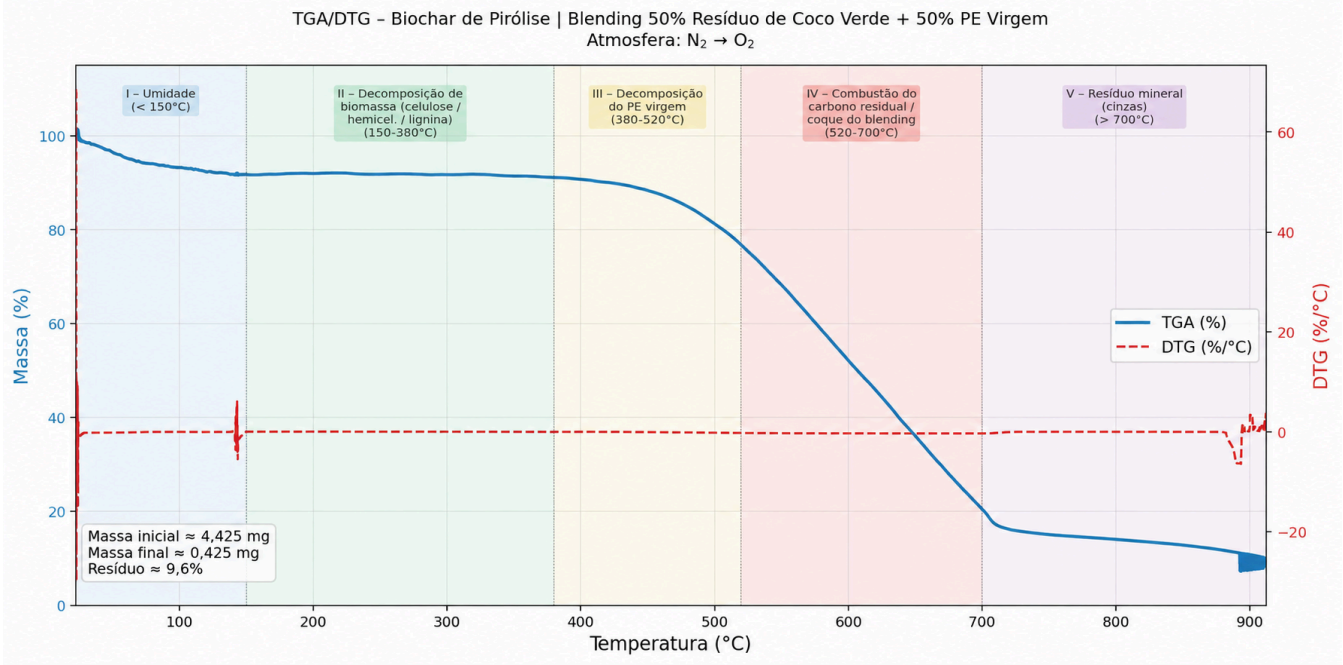


Figura 5 – Curva de análise termogravimétrica do biochar obtido na co-pirólise de 50% de resíduo de coco e 50% de polietileno.

Na caracterização por FTIR, o biochar apresentou espectro de baixa intensidade e pouca definição de bandas de absorção. Esse comportamento é compatível com a formação de uma matriz predominantemente carbonizada após o tratamento termoquímico, no qual a degradação e a desvolatilização dos constituintes da matéria-prima reduzem a quantidade e a diversidade de grupos funcionais presentes no sólido.

A fração condensada com aspecto de cera apresentou comportamento distinto. Foram observadas bandas intensas em aproximadamente 2917 e 2849 cm^{-1}, atribuídas ao estiramento de ligações C–H de estruturas alifáticas, além de sinais em aproximadamente 1463 e 1377 cm^{-1}, relacionados às deformações C–H de grupos CH_2 e CH_3. Essas bandas são características de estruturas hidrocarbonadas alifáticas e são compatíveis com produtos provenientes da degradação térmica de poliolefinas, como o polietileno (SMITH, 2021;

GUIMARÃES et al., 2025 MORRISON; BOYD, 2011;). Também foram identificados sinais em aproximadamente 3367 cm^{-1}, na região entre 1664 e 1606 cm^{-1} e em 1241 e 1033 cm^{-1}. Essas regiões podem estar relacionadas a grupos contendo oxigênio, como hidroxilas e ligações C–O, e/ou a estruturas insaturadas formadas durante o processo termoquímico. A presença desses sinais é compatível com a contribuição da fração lignocelulósica da carga, cuja decomposição pode originar diferentes compostos oxigenados (VUPPALADADIYAM et al., 2023; ASHWINI; RESMI; REGHU, 2024). A Figura 6 apresenta o resultado do FTIR para a cera obtida da co-pirólise.

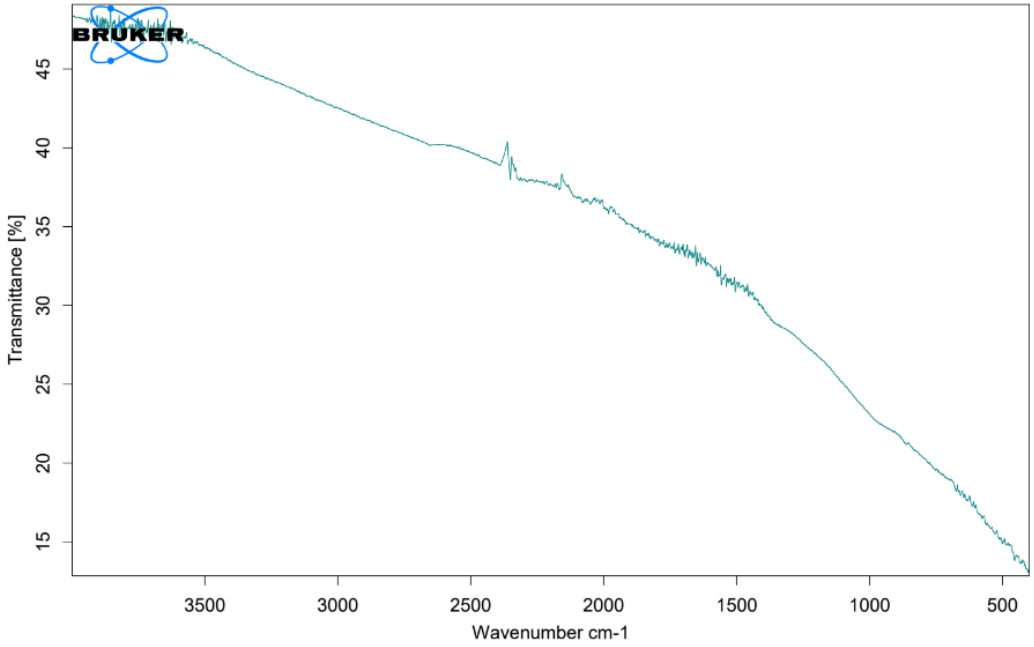


Figura 6 – Espectro de FTIR da cera obtida na co-pirólise de 50% de resíduo de coco e 50% de polietileno.

A predominância de bandas associadas às estruturas hidrocarbonadas na fração cerosa evidencia a contribuição do polietileno para a composição dos produtos condensados. Esse resultado é coerente com estudos de co-pirólise de biomassa e materiais plásticos, nos quais a elevada relação H/C das poliolefinas pode favorecer maior participação de hidrocarbonetos nos produtos formados (ENGAMBA ESSO et al., 2022; NAWAZ; RAZZAK, 2024). Entretanto, as análises realizadas apresentam caráter inicial e predominantemente qualitativo, não sendo possível, apenas a partir do FTIR, determinar individualmente os compostos presentes ou confirmar a ocorrência de efeitos sinérgicos entre as matérias-primas.

De maneira geral, a aplicação do procedimento ao ensaio de co-pirólise demonstrou que a rota sistematizada contempla as diferentes etapas necessárias à condução do experimento e à recuperação dos produtos. Os resultados reforçam a importância da padronização das atividades experimentais em uma unidade de pesquisa, ao mesmo tempo em que demonstram sua aplicabilidade ao estudo da conversão conjunta de resíduos de biomassa e materiais poliméricos.

Conclusões

As atividades desenvolvidas permitiram alcançar os objetivos propostos, contribuindo para a consolidação da rota experimental de pirólise no Laboratório Interdisciplinar de Soluções Ambientais (LISA-UFF). O acompanhamento dos experimentos possibilitou compreender, organizar e sistematizar as etapas que antecedem, compõem e sucedem uma reação de pirólise, abrangendo o preparo e a caracterização da carga, a montagem da unidade, a inertização, a operação, o resfriamento, a coleta dos produtos, a desmontagem, a limpeza e o registro das condições experimentais.

A partir dessa sistematização, foi elaborado um Procedimento Operacional Padrão (POP) para a unidade, contribuindo para a padronização das atividades, a segurança operacional, a rastreabilidade e a reprodutibilidade dos ensaios, além de servir como material de apoio para o treinamento de novos usuários. Por se tratar de uma unidade de pesquisa, o documento poderá ser continuamente atualizado à medida que novas matérias-primas, condições operacionais e procedimentos sejam incorporados.

A realização da co pirólise de uma carga composta por 50% de resíduo de casca de coco e 50% de polietileno virgem, a 500 °C, permitiu aplicar a rota metodológica estabelecida e demonstrou a possibilidade de processamento conjunto das duas matérias-primas na unidade. Foram recuperadas diferentes frações para caracterização, cujas análises iniciais por FTIR e TGA forneceram informações sobre suas características químicas e térmicas. Dessa forma, o trabalho estabeleceu uma base metodológica para a realização segura, padronizada e reprodutível de futuros ensaios de pirólise e co-pirólise no LISA-UFF.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado pela FAPERJ – Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, Processo SEI 260003/001612/2025.

Referências

MONTEIRO, Alessandra da Rocha Duailibe. CONTRIBUIÇÃO DA RECICLAGEM QUÍMICA DE RESÍDUOS PLÁSTICOS PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. Rio de Janeiro, 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

ABREMA (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2025. São Paulo: **ABREMA**, 2025.

PLASTICS EUROPE. PLASTICS – THE FAST FACTS 2025: global and European plastics production and economic indicators. Brussels: **Plastics Europe**, 2025. Disponível em: https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2025/.

DAI, L. et al. Pyrolysis technology for plastic waste recycling: A state-of-the-art review. **Progress in Energy and Combustion Science**, 2022



ENGAMBA ESSO, S. B. et al. Review on synergistic effects during co-pyrolysis of biomass and plastic waste: Significance of operating conditions and interaction mechanism. **Biomass and Bioenergy**, 2022

NAWAZ, A.; RAZZAK, S. A. Co-pyrolysis of biomass and different plastic waste to reduce hazardous waste and subsequent production of energy products: A review on advancement, synergies, and future prospects. **Renewable Energy**, 2024.

VIEIRA, G. FTIR: entenda como funciona a técnica. Disponível em: <https://c2lab.com.br/ftir-entenda-como-funciona-a-tecnica/>.

SMITH, Brian C. The Infrared Spectra of Polymers II: Polyethylene. Spectroscopy, 2021. Disponível em: https://www.spectroscopyonline.com/view/the-infrared-spectra-of-polymers-ii-polyethylene

MORRISON, R. T.; BOYD, R. N. Química orgânica. 16. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2011.

GUIMARÃES, I. C.; SÁ, M. S.; MARTINS, T.; WISNIEWSKI, A. JR. Assessment of co-pyrolysis of polypropylene with triacylglycerol-based waste biomass to obtain sustainable hydrocarbons. **Sustainable Chemistry**

VUPPALADADIYAM, A. K.; VUPPALADADIYAM, S. S. V.; SIKARWAR, V. S. et al. A critical review on biomass pyrolysis: Reaction mechanisms, process modeling and potential challenges. **Journal of the Energy Institute**, v. 108, 2023

ASHWINI, K.; RESMI, R.; REGHU, R. Pyrolysis characteristics and kinetic analysis of coconut shell and nutmeg shell for potential source of bioenergy. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, 2024.