

Produção de biocombustíveis a partir de lodo de esgoto e gordura residual via craqueamento térmico - catalítico na presença de HZSM-5

Biofuel production from sewage sludge and residual fat via thermal - catalytic cracking in the presence of HZSM-5


- **Data de entrada:**
01/10/2020
- **Data de aprovação:**
19/12/2022


Fernanda Paula da Costa Assunção^{1*} | Iuri do Nascimento de Souza¹ | Luiz Eduardo Pizarro Borges² | Nélio Teixeira Machado¹ | Lia Martins Pereira¹ | Hélio da Silva Almeida¹ |

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2023.062>


ORCID ID


Assunção FPC  <https://orcid.org/0000-0002-4094-2815>

Souza IN  <https://orcid.org/0000-0002-7556-7680>

Borges LEP  <https://orcid.org/0000-0002-2337-4238>

Machado NT  <https://orcid.org/0000-0001-9800-3565>

Pereira LM  <https://orcid.org/0000-0002-2466-6080>

Almeida HS  <https://orcid.org/0000-0003-0343-5862>

Resumo

O presente trabalho investigou o processo de craqueamento térmico-catalítico do lodo de esgoto e da gordura residual. Os experimentos foram realizados em uma unidade semipiloto com o objetivo de produzir Produto Líquido Orgânico (PLO) por meio do emprego de HZSM-5 como catalisador. A influência do catalisador foi avaliada nas temperaturas de 425°C, 450°C e 475°C a 5% (m/m) por meio do rendimento e qualidade dos PLOs utilizando as variáveis índice de acidez, densidade, viscosidade cinemática e análise composicional por GC-MS. Os resultados revelaram que o experimento de lodo e gordura com adição de catalisador HZSM-5 a 475°C apresentou o maior rendimento (14,73% m/m) em PLO. Quanto aos rendimentos para biocarvões e gases não condensáveis, os melhores resultados foram verificados para o experimento de lodo e gordura com adição de HZSM-5 a 425°C. Dessa forma, os resultados indicam viabilidade na produção de biocombustíveis a partir do craqueamento desses materiais.

Palavras-chave: Craqueamento térmico-catalítico. Lodo de esgoto. Gordura residual. Bio-óleo. Biocarvão.

Abstract

The present work investigated the thermal-catalytic cracking process of sewage sludge and residual fat. The experiments were carried out in a semi-pilot unit with the objective of producing Liquid Organic Product (PLO) using HZSM-5 as a catalyst. The influence of the catalyst was evaluated at temperatures of 425 ° C, 450 ° C and 475 ° C at 5% (w / w) through the performance and quality of PLOs through the variables: acidity index, density, kinematic viscosity and analysis compositional by GC-MS. The results revealed that the sludge and fat experiment with the addition of HZSM-5 catalyst at 475 ° C showed the highest yield (14.73% w / w) in PLO. Regarding the yields for biochars and non-condensable gases, the best results were verified for the sludge and fat experiment with the addition of HZSM-5 at 425° C. Thus, the results indicate feasibility in the production of biofuels from the cracking of these materials.

Keywords: Thermal-catalytic cracking. Sewage sludge. Residual fat. Bio-oil. Biochar.

¹ Universidade Federal do Pará - Belém - Pará - Brasil.

² Instituto Militar de Engenharia do Exército - IME - Rio de Janeiro - Rio de Janeiro - Brasil.

* **Autora correspondente:** fernanda.assuncao.itec@gmail.com.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a estratégia de economia circular da gestão das águas residuárias postula a busca de novas formas e estratégias de reutilização de resíduos oriundos do sistema de tratamento de esgoto, como o lodo de esgoto gerado em estações e as gorduras presentes em caixas retentoras de gordura. Entre elas, o tratamento térmico é uma das abordagens mais promissoras (ALMEIDA, 2016; PEREIRA, 2019; WANG et al., 2020).

Os despejos inadequados desses efluentes contendo esses materiais resultam em bloqueios nos sistemas de drenagem, causando uma redução do seu desempenho e a capacidade de transporte ao longo do tempo, além de causar também entupimentos nas tubulações, odores desagradáveis e corrosão das linhas de esgoto devido às reações anaeróbicas. Dessa forma, esses resíduos precisam ser removidos e encaminhados a um destino que não venha causar impactos ao meio ambiente (GODOY, 2013; WANG et al., 2013).

As tecnologias mais utilizadas entre os tratamentos térmicos para a reutilização desses materiais são combustão, gaseificação, pirólise (craqueamento térmico), liquefação, torrefação, carbonização hidrotérmica e digestão anaeróbica, entre outros (UEMURA et al., 2015; ATIENZAMARTÍNEZ et al., 2017; ZENG et al., 2017; SCHWITALLA et al., 2018) que podem converter o lodo de esgoto e a gordura residual em matéria-prima com valor agregado (FAN et al., 2017; REGKOUZAS & DIAMADOPOULOS, 2019).

Entre as rotas termoquímicas mencionadas, a pirólise (craqueamento térmico) ganhou uma atenção significativa por sua capacidade de aperfeiçoar o processo de conversão e maximizar o rendimento do produto por meio de vários tipos de reatores (ZHANG et al., 2017; ABDUL AZIZ et al., 2012). Esse método envolve a quebra de materiais à base de carbono em fragmentos menores por aquecimento em uma atmosfera anó-

xica a 400-800°C, produzindo biochar, bio-óleo e biogás (ARAZO et al., 2017; WEI et al., 2018). O óleo pirolítico obtido ou bio-óleo é um líquido de alta densidade que pode ser utilizado em biorrefinarias para compor misturas de gasolinas e diesel (MABROUKI et al., 2016).

A transformação termoquímica de materiais à base de lipídios, a exemplo da gordura residual, para a produção de combustíveis de materiais renováveis, pode ser realizado por craqueamento térmico de óleos vegetais, incluindo soja, palma e mamona (LIMA et al., 2004), sementes oleosas, como linhaça (KOCKAR et al., 2004), resíduo de azeite (UZUN et al., 2007) ou por craqueamento térmico-catalítico de óleos vegetais como soja (LIMA et al., 2004; BUZETZKI et al., 2011), óleo residual de soja (PRADO et al., 2009), palma (MOTA et al., 2014), bem como compostos de ácidos graxos (STORCK et al., 1998).

Na maioria desses estudos, tem sido utilizado como catalisador o HZSM-5 (LIMA et al., 2004; TIAN et al., 2008); OOI et al., 2004), que é considerado um tipo de peneira molecular pelo fato de reter moléculas grandes de materiais que tem particulados porosos, além de possuir seletividade na reação de compostos de moléculas grandes. Bem como metais de transição com suporte em alumina —NiMo /- Al₂O₃— (MARIADASSOU, 1993), catalisador REY (Rare Earth) (ONAY et al., 2004), MCM - 41 / ZSM - 5 (TWAIQ, 2004), os silicatos de alumínio, tais como H - mordenita, HY, sílica, argila com suporte em alumínio (AL - PILC) e composto de sílica - alumina (OOI et al., 2004).

No entanto, a aplicação da zeólita HZSM-5 como catalisador na quebra catalítica de biomassa até o momento não havia sido usado na transformação termoquímica do blend composto por óleos e gorduras e lodo de esgoto. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo investigar sistematicamente a produção e qualidade do bio-óleo (PLO) a partir do craqueamento térmico-catalí-

tico do lodo de esgoto com gordura residual das caixas retentoras de gordura, em escala semipiloto, visando orientar quanto às possibilidades de reaproveitamento desses materiais

2 Metodologia

2.1 Coleta e preparação das amostras

O lodo de esgoto foi obtido de um reator UASB (Reator Anaeróbio de Manta de Lodo e Fluxo Ascendente) da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da Vila da Barca, e a gordura residual foi coletada das caixas retentoras de gordura do sistema de tratamento de esgoto do Restaurante Universitário da Universidade Federal do Pará, ambos localizados na Região Metropolitana de Belém/PA-Brasil. As amostras foram submetidas aos seguintes processos de preparação: 1) Lodo - secagem térmica em estufa com circulação de ar (SOC. FABBE. Ltda, MOD.170) a 100°C por um período de 72 horas, atingindo um teor de umidade de aproximadamente 7% com posterior moagem (desagregamento) em moinho de bolas (WORK INDEK, CIMAQ modelo M.B. 12X); 2) Gordura residual - tratamento térmico (aquecimento variando de 70 a 100°C) para liquefazê-la seguida de separação da água e peneiramento

(peneira de 10 Mesh) para remoção de sólidos grosseiros. O catalisador utilizado no processo,

HZSM-5, foi calcinado em forno mufla (ZEZIMAQ - GP CIENTÍFICA), durante duas horas, com uma taxa de aquecimento de 5°C/min, a temperatura de 550°C.

2.2 Processos de Craqueamento térmico-catalítico

A unidade de craqueamento semipiloto foi montada sobre uma estrutura móvel, que é constituída por um reator de aço inoxidável (AISI 304) com geometria tubular e capacidade volumétrica de 2 litros, inserido em uma manta térmica acoplada na resistência circular e com controle digital de temperatura. Na unidade foram realizados 3 experimentos com o uso do catalisador HZSM-5 e comparados com Pereira (2019) que, em seu estudo, realizou experimento de craqueamento térmico do lodo e gordura residual de caixas retentoras de frigorífico na escala laboratorial em reator de leito fixo. As condições operacionais e os parâmetros de processo do experimento podem ser observados na Tabela 1, que foi baseada nos estudos de (PEREIRA, 2019; LANGUER, 2015; ALMEIDA, 2016).

Tabela 1 - Condições Operacionais do Processo

Experimentos	Matéria-prima (%)	Tipo de craqueamento/ Temperatura (°C)	Catalisador (%)
1	Lodo (60%) + Gordura (40%)	Térmico - Catalítico/425	HZSM-5 (5%)
2	Lodo (60%) + Gordura (40%)	Térmico - Catalítico/450	HZSM-5 (5%)
3	Lodo (60%) + Gordura (40%)	Térmico - Catalítico/475	HZSM-5 (5%)
PEREIRA (2019)	Lodo (60%) + Gordura (40%)	Térmico/450	----

Como os produtos líquidos condensáveis obtidos nos experimentos de craqueamento térmico e térmico-catalítico em escala semipiloto formaram fases diferenciadas (oleosa e aquosa), foi necessário submetê-los ao pro-

cesso de separação por meio de decantação; a fase oleosa foi submetida a lavagem por três vezes, com 30 ml de água destilada, à temperatura de 50 °C, visando à remoção de resíduo do catalisador.

2.3 Rendimentos dos produtos obtidos

Os rendimentos dos produtos obtidos nos experimentos de craqueamento foram calculados utilizando as Eq. 1, 2 e 3 de rendimento:

$$\text{Rendimento do PLO (\%)} = \frac{M_{PLO}}{M_{mp}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{Rendimento do Coque (\%)} = \frac{M_{coque}}{M_{mp}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{Rendimento do Gas (\%)} = \left(1 - \frac{M_{PLO}}{M_{mp}} - \frac{M_{coque}}{M_{mp}}\right) \times 100\% \quad (3)$$

Onde:

M_{PLO} - Massa do Produto Líquido Orgânico (bio-óleo - fase oleosa, aquosa);

M_{mp} - Massa do lodo +gordura ou massa do lodo;

M_{coque} - Massa de coque (biocarvão).

2.4 Caracterizações do produto líquido orgânico (PLO) obtido no experimento

2.4.1 Índice de acidez, densidade absoluta e viscosidade cinemática.

O índice de acidez do PLO (fase oleosa) foi determinado pelo método titulométrico, utilizando-se uma solução alcoólica de KOH (0,2 N) e uma solução indicadora de fenolftaleína (1% em álcool etílico 95%). Esse método é uma adaptação do método oficial AOCS Ca 5-40. A análise da densidade absoluta do PLO foi determinada segundo a metodologia oficial da ABNT NBR 7148, a qual estabelece a massa por unidade de volume da amostra contida em um picnômetro calibrado numa determinada temperatura, a qual pode ser feita diretamente sobre as amostras de teste (líquidos à temperatura ambiente). Quanto à viscosidade cinemática, foi determinada segun-

do a norma ASTM D 445 (2012). O procedimento experimental foi realizado em um viscosímetro Cannon-Fenske (SCHOTT GERATE, Modelo N° 520 23). Essa análise foi conduzida no equipamento utilizando um banho termostático na temperatura de 40 °C.

2.4.2 Cromatografia gasosa acoplada ao espectro de massas (GC-MS)

A identificação dos componentes químicos presentes nas amostras oleosas foi realizada por Cromatografia Gasosa acoplada Espectrometria de Massa (CG-MS). Esse método de análise consiste na volatilização da amostra e no seu transporte por meio de um gás de arraste (fase móvel) por meio de uma coluna cromatográfica, onde ocorre a separação. A análise dos componentes presentes foi realizada no equipamento Agilent Technologies – Modelo CG-7890B acoplado ao Espectrômetro de Massas modelo MS5977A, coluna capilar de sílica fundida SLBTM-5ms (30m x 0,25mm x 0,25um).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Rendimentos dos produtos obtidos no processo

Os parâmetros operacionais e a distribuição dos rendimentos dos produtos obtidos dos experimentos de craqueamento em escala semipiloto são apresentados na Tabela 2 em comparação aos estudos realizados por PEREIRA (2019), que trabalhou a uma temperatura de 450°C no processo de craqueamento térmico de lodo e gordura residual na escala de bancada e obteve resultados para o biocarvão, PLO total, PLO fase oleosa, PLO fase aquosa e gás 163 de 39,97%, 46,17%, 38,69%, 7,48% e 13,86%, respectivamente.

Tabela 2 - Distribuição dos produtos resultados dos experimentos (% em massa).

Experimentos	Parâmetros Operacionais				Rendimentos dos produtos obtidos				
	T _c (°C)	T _{ic} (°C)	t _{ic} (min)	t _{tc} (min)	Biocarvão (%)	PLO _T (%)	PLO _{FO} (%)	PLO _{FA} (%)	Gás (%)
1	425	228	30	65	38,73	28,4	12,27	16,13	32,9
2	450	226	20	65	45,11	24,66	11,30	13,36	30,23
3	475	220	18	68	40,67	29,16	14,73	14,43	30,17
PEREIRA (2019)	450	140	32	80	68,68	22,65	6,02	16,63	8,67

Legenda^a: TC - Temperatura de craqueamento; TIC - Temperatura inicial de craqueamento; telC Tempo inicial de craqueamento; teTC -Tempo total de craqueamento; PLO_T - Produto líquido orgânico total; PLO_{FO} - Produto líquido orgânico fase oleosa; PLO_{FA} - Produto líquido orgânico fase aquosa.

Observando os resultados descritos na Tabela 2, pode-se constatar que durante o processo experimental houve a formação de quatro produtos: (1) PLO em fase oleosa (bio-óleo); (2) PLO em fase aquosa; (3) biocarvão e (4) gases não condensáveis.

O efeito da temperatura de craqueamento tem grande influência na distribuição dos produtos do lodo de esgoto e gordura residual. Comparando os valores com os obtidos por Pereira (2019), que teve maior rendimento para o PLO, os resultados desse estudo mostraram que os produtos das reações apresentaram os melhores rendimentos para a produção de biocarvão, com valor médio de 41,5%. Em relação aos PLO's da fase oleosa obtidos, o melhor resultado foi constatado no experimento 3, atingindo um rendimento máximo de 14,73% em massa à temperatura de 475°C; consequentemente reduzindo o rendimento do biocarvão, que ficou em 40,67%. A formação da fase oleosa se deve principalmente à desvolatilização da matéria orgânica no lodo de esgoto, que foi promovida pela elevação da temperatura (acima de 500°C), pois havia mais energia disponível para quebrar as fortes ligações orgânicas —essa é a principal razão para o aumento inicial do rendimento da fase oleosa, que é devido ao aumento da temperatura, provocando a queda no rendimento do óleo abaixo da temperatura ideal, ocorrendo então as reações secundárias, como o craqueamento térmico dos compostos voláteis (descarbonilação). O craqueamento térmico é uma reação endotérmica e foi comprovada a sua eficiência em temperaturas superiores a aproximadamente 500° ou 550°C (XIE et al., 2014).

Pode-se observar que o pré-tratamento realizado em ambas as matérias-primas (lodo de esgoto e gordura residual) não foi completamente eficiente para remover toda a água do material residual, pois o teor de umidade ainda é representativo para os experimentos 1 e 3, que obtiveram rendimentos de fase aquosa de 16,63 e 14,43%, respectivamente. O gás variou entre 32,9% em massa, usando o catalisador HZSM-5 e 30,17%, para os experimentos 1 e 3, respectivamente. O seu rendimento foi calculado pela diferença entre a massa total da matéria-prima, do rendimento do produto sólido e do rendimento do produto líquido, enquanto o teor total de água foi calculado com base no rendimento das frações aquosas e oleosas. O rendimento de carvão e fração oleosa mostra uma correlação negativa com a temperatura de pirólise, porque a reação de decomposição é mais ativa em temperaturas mais altas. Isso contribuiu para a quebra de grandes compostos orgânicos em moléculas menores, o que resulta em aumento da produção de gás e água (LIU et al., 2015; WANG et al., 2020; XU et al., 2013).

3.2 Caracterizações do PLO (fase oleosa) obtido no processo

3.2.1 Índice de acidez, densidade absoluta e viscosidade cinemática do PLO (fase oleosa)

A Fig. 1 apresenta os resultados das análises de índice de acidez, densidade absoluta e viscosidade cinemática das alíquotas de PLO na fase oleosa obtidos no processo. O valor médio do índice de acidez dos experimentos usando o catalisador

HZSM-5 ficou em 95,62 mg KHO.g⁻¹, enquanto para Pereira (2019) o valor do experimento térmico de lodo e gordura ficou 209 em 65,70 mg KOH/g. Esses valores elevados para o índice de acidez podem ser justificados devido à presença de ácidos graxos na gordura residual, também constatada por Almeida et al. (2016) e De Oliveira (2019), que caracterizaram a mesma gordura residual utilizada neste estudo e encontraram valores para o índice de acidez de 72,73 e 135,07 KHO. g⁻¹ nas amostras testadas, respectivamente. Valores semelhantes a este estudo foram obtidos por Santos et al. (2010), que realizaram experimentos de craqueamento térmico a 350 e 400°C de sebo bovino e apresentaram como resultado um PLO com valor de acidez de 87,07 mg KOH.g⁻¹; Prado & Antoniosi Filho (2009), em seus experimentos de craqueamento térmico-catalítico de óleo de soja, obtiveram valores de índices de acidez entre 44,6 e 90,8 mg KOH.g⁻¹.

Em relação à densidade analisada, os valores médios para as amostras da fase oleosa foram de 0,85 g/cm³, também influenciada pela presença da gordura residual, que é normalmente menos densa que o lodo de esgoto. Esses valores estão consonantes com Pereira (2019), que em seus experimentos de craqueamento térmico-catalítico usando lodo + gordura residual e o catalisador Na₂CO₃ (carbonato de cálcio) obteve valores entre 0,92 e 0,96g/cm³, Almeida et al. (2016), em seus experimentos de craqueamento térmico-catalítico usando a gordura residual e 5% de lama vermelha como catalisador, também obtiveram valores para densidade entre 0,85 e 0,95 g/cm³, e De Oliveira (2019), em seus estudos de craqueamento térmico-catalítico com gordura residual e 5,10, e 15% de lama vermelha como catalisador, obteve valores de densidade entre 0,80 e 0,85 g/cm³.

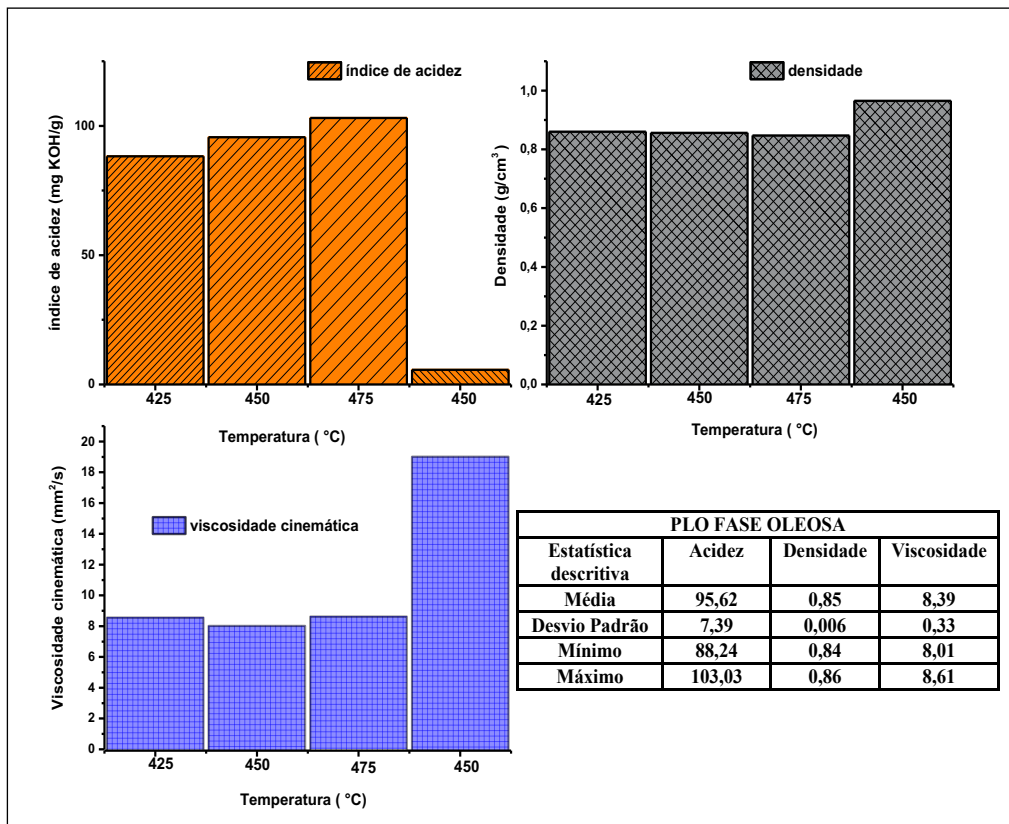


Figura 1 - Índice de acidez, densidade absoluta e viscosidade cinemática das alíquotas de PLO (fase oleosa) dos experimentos.

Para a viscosidade cinemática foi encontrado valor médio de 8,39 mm²/s, valor semelhante ao de Pereira (2019), que realizou processo de craqueamento do lodo de esgoto a 440°C e teve como resultado um valor de viscosidade de 9,33 mm²/s.

Na Tabela 3 estão descritos os resultados para as análises cromatográficas realizadas, que foram

identificados grupos funcionais presentes como (hidrocarbonetos, compostos oxigenados, nitrogenados e organoclorados), bem como as porcentagens em área dos picos observados. Como critério para a escolha do melhor resultado para a aplicação de biocombustíveis, foi selecionado o valor da soma dos percentuais de área de hidrocarbonetos na composição dos PLO's (SASSINE, 2002).

Tabela 3 - Quantificação de compostos por GC-MS dos PLO's (fase oleosa) obtidos

Composição (%)	EXP1	EXP2	EXP3	PEREIRA (2019)
Parafina	47,27	45,93	34,66	49,70
Olefina	14,61	13,57	10,13	20,31
Olefina Cíclica	-	-	-	-
Monoaromático	-	-	3,64	-
Poliaromático	-	-	-	-
Total de Hidrocarbonetos	61,88	59,5	48,43	70,01
Álcool	4,88	2,26	4,78	12,73
Aldeído	9,27	9,02	7,13	-
Ácido Carboxílico	1,3	0,3	9,0	-
Cetona	-	-	-	0,57
Éster	5,32	-	-	-
Éster metílico de ácido graxo	-	-	6,41	1,22
Total de Compostos Oxigenados	20,77	11,58	27,32	14,52
Compostos Nitrogenados	17,28	28,91	26,63	15,48
Compostos Organoclorados	-	-	-	-
Outros	-	-	-	-

Os valores médios do percentual de área dos hidrocarbonetos para os experimentos de acordo com as inferências de estatística descritiva (Fig. 2) foram de 56,60%. Em relação à subdivisão dos hidrocarbonetos compoendo as amostras de PLOs formadas, foram observados valores máximos que alcançaram: 47,27 % de parafinas e 14,61% de olefinas no PLO Fase Oleosa para o Exp. 1; 20,11% de monoaromáticos. Os resultados demonstram que os produtos oleosos do craqueamento térmico-catalítico do lodo e gordura +HZSM-5 podem conter em sua composição concentrações elevadas de compostos aromáticos, condição já verificada nos produtos oleosos, de acordo com a literatura de referência (PEREIRA, 2019; 254 LANGUER, 2015; ALMEIDA, 2016).

Compostos aromáticos em concentrações elevadas são indiferentes às propriedades dos biocombustíveis, tendo os seus limites estabelecidos pela Agência Nacional de Petróleo, Gases naturais e Combustíveis (ANP), por meio da Resolução n°. 40 de 25 de outubro de 2013. No entanto, deve-se considerar a importância da sua aplicação em vários setores da indústria, a exemplo da farmácia, alimentícia, química, entre outros, servindo como matéria-prima na fabricação de diversos produtos (NOVAIS & ANTUNES, 2016; BETTIN, S. M. & FRANCO, 2001).

Em relação aos compostos oxigenados, os valores médios dos experimentos térmico-catalíticos ficaram em 19,89%, representados por álcoois (11,92 %), aldeídos (25,42 %) e ácidos carboxíli-

cos (10,6%). A formação de ácidos carboxílicos é devida, de acordo com Pereira (2019), à presença de 6-Ácido octadecanóico e o 9-Ácido octadecanóico, podendo ter sido causada, também,

pela adição de material graxo (gordura) usado como matéria-prima, junto com o lodo, além do uso do catalisador ácido HZSM-5, similar ao resultado da autora que obteve valor de 14,52%.

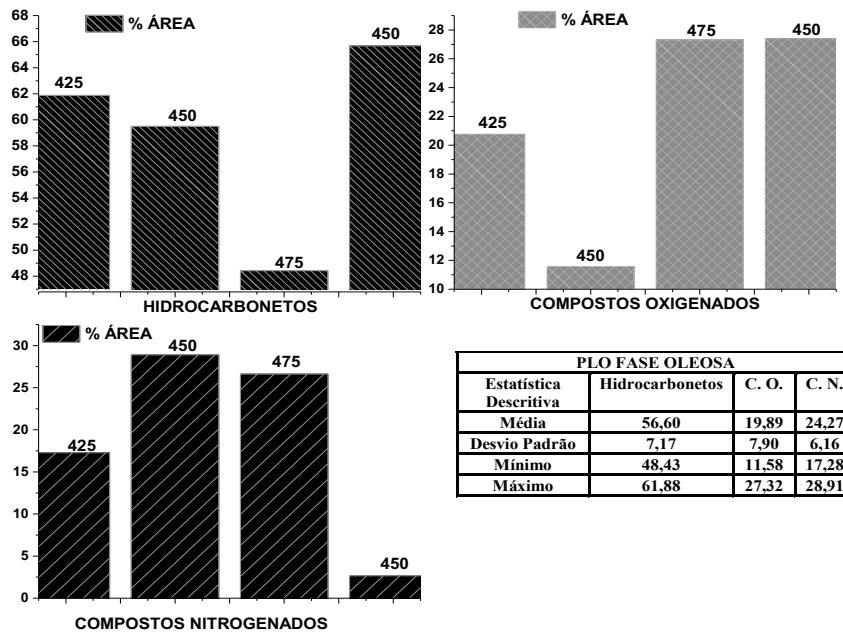


Figura 2 - Análise composicional, por grupo formado, das amostras de PLOs obtidos nos experimentos. **Legenda** *: PLO: Produto Líquido Orgânico; C.O: Composto Oxigenado; C.N: Composto Nitrogenado.

Quanto ao valor médio de compostos nitrogenados dos experimentos térmico-catalíticos, esses ficaram em 24,27%. Essas amostras forneceram uma variedade de compostos nitrogenados, que ficou em 49%. Para Veras et al. (2015), esses compostos são oriundos da proteína, que é uma das principais substâncias que compõem o lodo de esgoto, enquanto as amidas são provavelmente derivadas dos produtos da pirólise de quitina e amino-açúcares (VERAS et al., 2015; CAO et al., 2010).

4 CONCLUSÕES

Com base nas avaliações feitas no trabalho, concluiu-se que:

O blend (mistura) de lodo de esgoto e gordura residual, com a adição do catalisador HZSM-5, mostrou-se como matéria-prima viável para o aproveitamento por meio de craqueamento térmico-catalítico, e eficiente para a redução da massa desses rejeitos de tratamentos de esgoto com a possibilidade de utilização desse material para fins energéticos, o que irá contribuir para a preservação do meio ambiente e da saúde humana.

A análise composicional dos PLOs obtidos nos experimentos permitiu concluir que a presença considerável de hidrocarbonetos nos PLOs obtidos poderá ser aproveitada na produção de biocombustíveis; porém recomenda-se o melhoramento desses produtos com o conhecido upgrade em bio-óleo para viabilizar sua aplicabilidade.

É importante destacar que a partir desses materiais sem valor comercial agregado, e com processos e operações relativamente simples, foi possível a obtenção de biocombustíveis de boa qualidade, que podem ser misturados aos derivados de petróleo.

5 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Conceituação: Almeida HS; **Metodologia:** Assunção FPA; Machado NT.; Souza IN; **Investigação:** Assunção FPA.; Machado NT; **Co-orientação:** Borges LEP; **Análise formal:** Assunção FPA.; Machado NT; **Supervisão e orientação:** Almeida HS; **Redação do rascunho original:** Assunção FPA; **Dados de curadoria:** Almeida HS; Recursos: Borges LEP

6 AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer e dedicar esta pesquisa em memória ao Professor Doutor Hélio da Silva Almeida, que lecionava na Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental da Engenharia/UFPa. Sua alegria, dedicação, inteligência, honestidade, seriedade e bondade serão sempre lembradas.

7 REFERÊNCIAS

ABDUL, S.M., WAHI, R., NGAINI, Z., HAMDAN, S. Bio-oils from microwave pyrolysis of agricultural wastes. **Fuel Process. Technol.**, 106 (2013), pp.744-750. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.10.011>

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E COMBUSTÍVEL - ANP. Resolução Nº 40, de 25 de outubro de 2013. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2013.

ALMEIDA, S. H; CORRÊA, O.A; EID, J.G; RIBEIRO, H.J; CASTRO, D.A.R; PEREIRA, M.S; PEREIRA, L.M; ANDRADE MÂNCIO, A; SANTOS, M.C; DA SILVA SOUZA, J.A; BORGES, L. E.P; MENDONÇA, N.M ; MACHADO, N.T. Production of biofuels by thermal catalytic cracking of scum from grease traps in pilot scale. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, March 2016, Vol.118, pp.20-33. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.12.019>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7148: Petróleo e derivados de petróleo**. Determinação da massa

específica, densidade relativa e °API — Método do densímetro. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D445-12, **Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids (and calculation of dynamic viscosity)**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

ARAZO, R.O., GENUINO, D.A.D., DE LUNA, M.D.G., CAPAREDA, S.C. Bio-oil production from dry sewage sludge by fast pyrolysis in an electrically-heated fluidized bed reactor, **Sustain. Environ. Res.**, 27 (2017), pp. 7-14. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2016.11.010>

ATIENZA-MARTÍNEZ, M., RUBIO, I., FONTS, I., CEAMANOS, J., GEA, G. Effect of torrefaction on the catalytic post-treatment of sewage sludge pyrolysis vapors using γ -Al₂O₃, **Chem. Eng. J.**, 308 (2017), pp. 264-274. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.09.042>.

AOCS. 2009. **Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists' Society**. Champaign.

BETTIN, S. M. & FRANCO, D. Wagner. Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) 331 em aguardentes. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, Campinas, 25(2): 234-238, abr.-jun. 2005. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612005000200008>

BUZETZKI, E., SIDOROVÁ, K., CVENGROSOVÁ, Z., CVENGROS, J. Effects of oil type 334 on products obtained by cracking of oils and fats, **Fuel Process. Technol.** 92. (2011) 2041– 335 2047. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.06.005>

CAO, X.; HARRIS, W. Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation. **Biores. Technol.**, v.101, n.14, p.5222-5228, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.052>

DE OLIVEIRA, R. M. **Craqueamento termo catalítico de resíduos sólidos de caixas de gordura utilizando como catalisador a lama vermelha ativada**. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia). Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará. Belém, 2019.

GODOY, L. C. **A logística na destinação do lodo de esgoto**. **Revista Científica On-line Tecnologia, Gestão e Humanismo**. Faculdade de Tecnologia de Guaratinguetá, São Paulo:Revista v.2, n.1, nov. 2013.

ROCHA FILHO, G.N., BRODZKI, D., DJÉGA-MARIADASSOU, G., Formation of alkanes, alkylcycloalkanes and alkylbenzenes during the catalytic hydrocracking of vegetable oils. **Fuel** 72 (4) (1993) 543–549. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(93\)90114-H](https://doi.org/10.1016/0016-2361(93)90114-H).

LIU, J., FU, J., NING, X., SUN, S., WANG, Y., XIE, W., HUANG, S., ZHONG, S. An experimental and thermodynamic equilibrium investigation of the Pb, Zn, Cr, Cu, Mn and Ni partitioning during sewage sludge incineration. **J. Environ. Sci. (China)**, 35 (2015), pp. 43-5. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.01.027>

- LIU, G., SONG, H., WU, J. Thermogravimetric study and kinetic analysis of dried industrial sludge pyrolysis, **Waste Manag.** **41** (2015) 128–133. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.03.042>
- LIMA, D. G., SOARES, V. C.D., RIBEIRO, E.B., CARVALHO, D.A., CARDOSO, E. C.V., RAISSI, F. C., MUNDIM, K.C., RUBIM, J. C., SUAREZ, P.A.Z. Diesel-like fuel obtained by pyrolysis of vegetable oils, **J. Anal. Appl. Pyrolysis** **71** (2) (2004) 987–996. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2003.12.008>
- MOTA, S.A.P., MANCIO, A.A., LHAMAS, D.E.L., DE ABREU, D.H., DA SILVA, M.S., DOS SANTOS, W.G., DE CASTRO D.A.R., DE OLIVEIRA, R.M., ARAÚJO, M.E., BORGES, L.E.P., MACHADO, N.T. Production of green diesel by thermal catalytic cracking of crude palm oil (Elaeis guineensis Jacq) in a pilot plant, **J. Anal. Appl. Pyrolysis** (2014) 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.06.011>
- NOVAIS, V. D. L. & ANTUNES, M. T. **Vivá: química: volume 3: ensino médio.** – Curitiba: Positivo, 2016.
- OOI, Y.S., ZAKARIA, R., MOHAMED, A., BHATIA, S. Catalytic Conversion of Palm Oil Based Fatty Acid Mixture to Liquid Fuel. **Biomass and Bioenergy**. 2004; 27:477–484. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.03.003>
- ONAY, O., KOCKAR, O.M., 2004. Fixed-bed Pyrolysis of Rapeseed (Brassica napus L.). **Biomass Bioenergy** **26** (3), 289–299. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00123-5](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00123-5)
- PEREIRA, M. S. **Estudo do Processo de Craqueamento Termocatalítico de Polímeros (Polietileno, Polipropileno e Poliestireno) para Produção de Combustível.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Belém, 2016.
- PEREIRA, L. M. **Estudo do processo de craqueamento de lodo de esgoto, em diferentes escalas, visando alternativas de aproveitamento.** Tese (Doutorado). Universidade Federal do Pará. Instituto de tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia. Belém, 2019.
- PRADO, C.M.R., ANTONIOSI FILHO, N.R. Production and characterization of the biofuels obtained by thermal cracking and thermal catalytic cracking of vegetable oils, **J. Anal. Appl. Pyrolysis** **86** (2009) 338–347. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2009.08.005>
- SANTOS, A. L. F.; MARTINS, D. U.; IHA, O. K. et al. Agro-industrial residues as low-price feedstock for diesel-like fuel production by thermal cracking. **Bioresour. Technol.** n. 101, p. 6157 – 6162, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.100>
- SCHWITALLA, D., REINMÖLLER, M., FORMAN, C., WOLFERSDORF, C., GOOTZ, M., BAI, J., GUHL, S., NEUROTH, M., MEYER, B. Ash and slag properties for co-gasification of sewage sludge and coal: An experimentally validated modeling approach. **Fuel Process. Technol.**, 175 (2018), pp. 1–9, <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.02.026>.
- STORCK, S., BRETINGER, H., MAIER, W.F. Characterization of micro- and mesoporous solids by physisorption methods and pore-size analysis, **Appl. Catal. A: Gen.** **174** (1998) 137 – 146. [https://doi.org/10.1016/S0926-860X\(98\)00164-1](https://doi.org/10.1016/S0926-860X(98)00164-1)
- TIAN, H., LI, C., YANG, C., SHAN, H. Alternative processing technology for converting vegetable oils and animal fats to clean fuels and light olefins, **Chin. J. Chem. Eng.** **16** (3) (2008) 394–400. [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(08\)60095-6](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(08)60095-6)
- TWAIQ, FAROUQ, A. A., MOHAMAD, A. R., BHATIA, S. “Performance of composite catalysts in palm oil cracking for the production of liquid fuels and chemicals”. **Fuel Processing Technology**, Vol. 85, Nº 11, 2004, 1283–1300. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2003.08.003>
- UEMURA, Y., MATSUMOTO, R., SAADON, S., MATSUMURA, Y. A study on torrefaction of laminaria japonica. **Fuel Process. Technol.**, 138 (2015), pp. 133–138, <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.05.016>.
- UZUN, B.B., PÜTÜN, E., PÜTÜN, E.A. Composition of products obtained via fast pyrolysis of olive-oil residue: effect of pyrolysis temperature, **J. Anal. Appl. Pyrolysis** **79** (1–2) (2007) 15–147. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2006.12.005>
- VERAS, T.S., IATA, R., NERIS, J.C e PACHECO FILHO, J.G.A. Estudo dos compostos nitrogenados e oxigenados obtidos a partir da pirólise térmica do lodo de esgoto anaeróbico coletados na ETE-Mangueira. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ), XX., 2014. Anais eletrônico, Florianópolis- Santa Catarina. **Anais...**
- WANG, S., GUO, Z., CAI, Q., GUO, L. Catalytic conversion of carboxylic acids in bio-oil for liquid hydrocarbons production. **Biomass Bioenergy**, **45** (2012), pp. 138–143. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.05.023>.
- WANG, S., PERSSON, H., YANG, W., JONSSON, P. Pyrolysis study of hydrothermal carbonization-treated digested sewage sludge using a Py-GC/MS and a bench-scale pyrolyzer. **Rev Fuel.** **262** (2020) 116335. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116335>.
- WEI, F., CAO, J.P., ZHAO, X.Y., REN, J., GU, B., WEI, X.Y. Formation of aromatics and removal of nitrogen in catalytic fast pyrolysis of sewage sludge: a study of sewage sludge and model amino acids. **Fuel**, 218 (2018), pp. 148–154, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.01.025>.
- XIE, Q.L. , PENG, P. LIU, S.Y., MIN, M., CHENG, Y.L., WAN, Y.Q., LI, Y., LIN, X.Y., LIU, Y.H., CHEN, P., RUAN, R. Fast microwave-assisted catalytic pyrolysis of sewage sludge for bio-oil 439 production, **Bioresour. Technol.** **172** (2014) 162–168. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.006>
- XU, J.; JIANG, J.; ZHANG, T.; DAL, W. Biofuel Production from Catalytic Cracking of Triglyceride Materials Followed by an Esterification Reaction in a Scale-up Reaction. **Energy Fuels** .v.27, p. 255–261, 2013. <https://doi.org/10.1021/ef3018173>