

Conversão catalítica do caroço de açaí em bio-óleo por liquefação hidrotérmica

Helena S. A. Bonilla^{1,2*}, Pedro N. Acácio Neto^{1,2}, Santiago Arias^{1,3}, José G. A. Pacheco^{1,3}, Leandro Danielski^{1,2}

¹ Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Av. dos Economistas, s/n, Recife 50740-590, Brasil

² Laboratório de Combustíveis (LAC-UFPE), Instituto de Pesquisa em Petróleo e Energia

(i-LITPEG), Universidade Federal de Pernambuco, Av. da Arquitetura, s/n, Recife 50740-550, Brasil

³ Laboratório de Refino e Tecnologias Limpas (LabRefino/LateClim) Instituto de Pesquisa em Petróleo e Energia (i-LITPEG), Universidade Federal de Pernambuco, Av. da Arquitetura, s/n, Recife 50740-550, Brasil

Resumo/Abstract

RESUMO - Este trabalho avaliou a conversão termoquímica do caroço de açaí por meio da liquefação hidrotérmica (HTL), utilizando catalisadores de óxidos mistos de níquel e alumínio (NiAl) sintetizados a partir de hidrotalcita. A biomassa foi submetida à HTL a 300 °C com tempos de reação de 1h e 1h30 min, e os produtos obtidos foram caracterizados quanto ao rendimento, poder calorífico e composição funcional. As análises de TGA, DRX, FT-IR e H₂-TPR do catalisador indicaram a formação de óxidos mistos estáveis, com diferentes graus de interação entre Ni e Al, o que influenciou diretamente a conversão e qualidade do bio-óleo. O catalisador promoveu maior rendimento e alteração na composição funcional do bio-óleo, ainda que com leve redução no poder calorífico. Os resultados evidenciam o potencial do catalisador para aplicações energéticas, especialmente em reações de conversão de biomassa. Como perspectivas futuras, propõe-se a reutilização do catalisador em múltiplos ciclos, a otimização das condições reacionais (como temperatura, pressão, tempo e tipo de solvente) e a purificação do bio-óleo para viabilizar seu uso direto como biocombustível.

Palavras-chave: Liquefação hidrotérmica, biomassa, bio-óleo, catalisadores de óxidos mistos, hidrotalcita.

ABSTRACT - This study evaluated the thermochemical conversion of açaí seed through hydrothermal liquefaction (HTL), using nickel–aluminum mixed oxide (NiAl) catalysts synthesized from hydrotalcite. The biomass was subjected to HTL at 300 °C with reaction times of 1 hour and 1 hour and 30 minutes, and the resulting products were characterized in terms of yield, calorific value, and functional composition. TGA, XRD, FT-IR, and H₂-TPR of the catalyst analyses confirmed the formation of stable mixed oxides with different degrees of interaction between Ni and Al, which directly influenced both conversion and bio-oil quality. The presence of the catalyst led to higher bio-oil yields and changes in its chemical functionality, despite a slight reduction in heating value. These results highlight the potential of NiAl-based catalysts for energy applications, especially in biomass conversion processes. Future perspectives include catalyst reuse over multiple cycles, optimization of reaction conditions (e.g., temperature, pressure, time, solvent type), and upgrading of the bio-oil to enable its direct use as a biofuel.

Keywords: Hydrothermal liquefaction, biomass, bio-oil, mixed oxide catalysts, hydrotalcite.

Introdução

A liquefação hidrotérmica (HTL) de biomassa tem se destacado entre as tecnologias de produção de biocombustíveis a partir de resíduos, como pirólise e gaseificação, por não exigir a secagem prévia da biomassa e por apresentar menor consumo energético. Essas características podem tornar o processo mais eficiente e economicamente atrativo (1). Diversas matérias-primas podem ser utilizadas na HTL, incluindo resíduos agrícolas, domésticos, biomassa lignocelulósica e plantas aquáticas. Entre essas opções, o caroço de açaí (*Euterpe oleracea*) surge como alternativa promissora, pois é um resíduo abundante e às vezes descartado de forma inadequada, provocando impactos ambientais como entupimento de bueiros e alagamentos (2). Com uma composição de lignina

(24,8%), hemicelulose (26,8%) e celulose (46,2%), o caroço de açaí apresenta potencial para geração de energia (3).

A liquefação hidrotérmica (HTL) de biomassa lignocelulósica gera quatro frações principais: bio-óleo, fase aquosa, fase gasosa e bio-char. O bio-óleo é o produto mais valorizado, podendo substituir combustíveis fósseis, mas exige tratamentos como hidrotratamento devido à sua alta viscosidade e teor de oxigênio. Sua composição varia com a biomassa usada e influencia diretamente seu poder calorífico. O bio-char pode conter resíduos não reagidos e compostos poliméricos ricos em carbono, sendo potencialmente útil como fertilizante. A fase aquosa é rica em nutrientes (N, P, K) e pode ser aproveitada na agricultura ou reutilizada no próprio processo. Já a fase gasosa, composta principalmente por CO₂, tem seu rendimento influenciado por tempo de reação, temperatura e

catalisadores, embora seu uso ainda seja pouco explorado (1; 4).

A utilização de catalisadores na HTL é capaz de aumentar o rendimento do bio-óleo, reduzir a formação de biochar e diminuir a presença de heteroátomos no produto final, além de potencializar o poder calorífico do biocombustível. A escolha adequada do catalisador é fundamental para otimizar esses efeitos. Entre os catalisadores heterogêneos, os metais de transição suportados, como níquel, cobre, cobalto e zinco, têm se mostrado eficazes na hidrólise de celulose, lignina e hemicelulose, atuando como ácidos e bases de Lewis. Catalisadores de óxidos mistos derivados de hidrotalcitas também são promissores, oferecendo estabilidade térmica e contribuindo para o aumento do rendimento e qualidade do bio-óleo (Shen et al., 2021). Em especial, óxidos mistos de Ni e Al favorecem reações como a desoxigenação, hidrólise, quebra das ligações C-C, além de promover a hidrogenação e possuir alta atividade catalítica (4-5).

Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a conversão da biomassa do caroço de açaí em bio-óleo por meio do processo de hidroliquefação térmica, empregando como catalisador óxidos mistos de níquel e alumínio.

Experimental

Síntese e caracterização do catalisador

A síntese do catalisador foi baseada na metodologia desenvolvida por Arias *et al.* (2022). O objetivo da síntese foi preparar o catalisador de óxido misto com alto teor de alumínio a partir da hidrotalcita de fórmula química $\text{Ni}_{0,2}\text{Al}_{0,8}(\text{OH})_2(\text{TA})_{0,4}\text{H}_2\text{O}$. Inicialmente, preparou-se 200 mL de solução contendo $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 0,4 mol.L⁻¹ (Dinâmica, 98,5% de pureza) e $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0,1 mol.L⁻¹ (Sigma Aldrich 99% de pureza), além de 400 mL de outra solução contendo NaOH 1 mol.L⁻¹ e ácido tereftálico 0,19 mol.L⁻¹, ambas preparadas utilizando água destilada previamente fervida. Em seguida, essas soluções foram adicionadas lentamente a um balão que já possuía 200 mL de água destilada. A reação ocorreu a uma temperatura de 60 °C, mantendo o pH em 6,5 pela adição das soluções e o sistema agitando durante todo o processo. Após finalizar a adição dos reagentes, deixou-se o precipitado agitando por 20 horas, sendo as 4 primeiras na temperatura da reação e as demais horas em temperatura ambiente. Em seguida, o material precipitado passou por uma etapa de lavagem e filtração, levando-o a estufa a 100 °C por 20 horas (6).

Em seguida, a hidrotalcita foi calcinada por 3 horas na temperatura de 550 °C, a uma taxa de aquecimento de 10 °C.min⁻¹, utilizando o forno mufla EDGCON 7000-10P (EDG).

O catalisador e o precursor formado passaram pelas seguintes caracterizações: Difração de Raios-X (DRX), realizada no equipamento Smartlab SE (Rigaku) utilizando a faixa de análise de 2θ de 3° a 80°, a uma taxa de 2°/min, o

passo igual a 0,002° e a corrente e voltagem do equipamento iguais a 30 mA e 40 KVA, respectivamente.; Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR), utilizando o equipamento Spectrum 3 (PerkinElmer) com uma faixa de 550 cm⁻¹ a 4000 cm⁻¹, resolução de 4 cm⁻¹ e fazendo 32 varreduras; O precursor passou pela análise Termogravimétrica (TGA) no equipamento TGA STA 449 F3 Jupiter (Netzsch) com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, na faixa de temperatura de 25 °C a 900 °C utilizando o gás nitrogênio como atmosfera; Realizou-se a análise de Redução a Temperatura Programada (TPR) no catalisador utilizando o equipamento Chemisorb 2720 da Micromeritics. Inicialmente, as amostras foram submetidas a um pré-tratamento térmico a 300 °C por 60 minutos sob fluxo contínuo de nitrogênio, com o objetivo de remover umidade e impurezas superficiais. Em seguida, o sistema foi resfriado até temperatura ambiente. A etapa de redução foi conduzida sob uma mistura gasosa de hidrogênio/argônio (10% H₂ em Ar), com vazão de 40 mL·min⁻¹, e o aquecimento foi realizado a uma taxa de 10 °C·min⁻¹, até atingir a temperatura máxima de 1000 °C.

Hidroliquefação térmica

A liquefação hidrotérmica foi realizada em um reator de 250 mL da Parr Instruments equipado com agitador magnético, conforme metodologia adaptada de Silva *et al.* (2024). Utilizou-se uma mistura de biomassa (caroço de açaí triturado) e solvente (água destilada) na proporção de 1:9 (10 g de biomassa para 90 g de solvente). Após a purga com nitrogênio e pressurização a 50 bar, o reator foi aquecido com agitação constante de 100 rpm até a temperatura final de reação de 300 °C. As reações foram conduzidas por 1 hora e 1 hora e 30 minutos, permitindo a comparação dos efeitos térmicos ao longo do tempo sobre o rendimento do bio-óleo obtido. O tempo total de reação de 1 hora foi considerado a partir do momento em que o material iniciou sua degradação, sendo finalizado no instante em que o reator atingiu a temperatura de 300 °C, servindo como referência para comparação com o tempo estendido de 1 hora e 30 minutos. Ao final da reação, o sistema foi resfriado até cerca de 40 °C, despressurizado e aberto, seguido da separação do material reacional por filtração a vácuo. O mesmo processo foi repetido agora com a adição do catalisador, utilizando 5% em massa em relação à biomassa empregada (1). O catalisador foi inicialmente adicionado ao reator e homogeneizado com a biomassa. Em seguida, realizou-se a adição do solvente. As etapas subsequentes seguiram procedimentos similares.

A fração sólida, contendo bio-óleo adsorvido e biochar, foi extraída em sistema Soxhlet com acetona por cerca de 8 horas. O bio-óleo extraído foi então concentrado em evaporador rotativo a 60 °C e pressão reduzida (-150 mmHg), resultando no bio-óleo concentrado. O cálculo do

rendimento do bio-óleo obtido ocorreu de acordo com a Equação 1.

$$Y_{Bio-\text{óleo}}(\%) = \frac{m_{Bio-\text{óleo}}}{m_{biomassa}} \times 100 \quad (1)$$

As amostras foram identificadas de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1. Identificação das amostras.

Código	Solvente	Tempo de reação	Temperatura (°C)	Catalisador (% m/m)
AA300-0	Água destilada	1h	300	0
AA300-0C	Água destilada	1h	300	5
AA300-30	Água destilada	1h 30 min	300	0
AA300-30C	Água destilada	1h 30 min	300	5

O bio-óleo obtido para um tempo de reação de 1 hora foi caracterizado por meio de duas técnicas analíticas: Calorimetria de Varredura Diferencial (DSC), utilizada para a determinação do poder calorífico, e espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR). A análise de DSC foi realizada no equipamento TGA STA 449 F3 Jupiter (Netzsch), sob atmosfera inerte, com uma faixa de temperatura de 25 °C a 900 °C e uma taxa de aquecimento de 10 °C/min. Com a curva de DSC, calculou-se a área do pico de calor liberado, de forma que a área é proporcional ao calor total da reação. A análise de FT-IR foi conduzida no equipamento Spectrum 3 (PerkinElmer), abrangendo a faixa espectral de 550 cm⁻¹ a 4000 cm⁻¹, com 64 varreduras e resolução de 8 cm⁻¹. Para efeito de comparação, ambas as análises foram realizadas também na biomassa de caroço de açaí.

Resultados e Discussão

Caracterização do precursor e catalisador

Na Figura 1, é possível observar o resultado da análise de DRX da hidrotalcita e catalisador obtido após a calcinação.

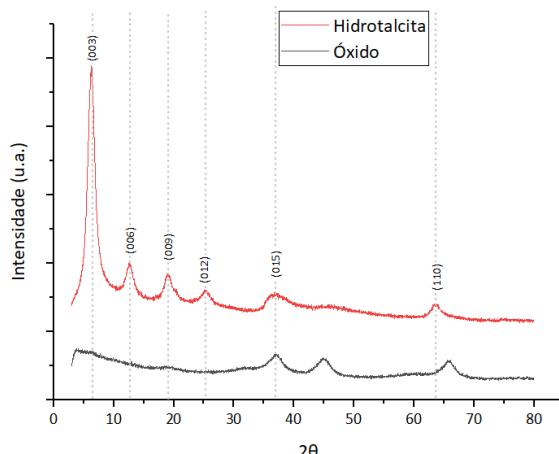


Figura 1. Difratogramas de raios X da hidrotalcita e do óxido misto obtido após a calcinação

No difratograma do precursor, é possível observar picos próximos de 2θ iguais a 6,25° (003), 12,65° (006), 18,94° (009), 25,39° (012), 36,52° (015) e 63,54° (110). Esses picos são característicos da estrutura lamelar da hidrotalcitas com ânion de compensação tereftalato, indicando sucesso em formar essa estrutura. O espaçamento basal, dado pela distância do plano (003) d(003) foi de 14,1 Å, também sendo uma característica para a hidrotalcita intercalada com tereftalato (5-7).

Após a calcinação, o difratograma do óxido misto apresenta picos mais alargados e de menor intensidade que o precursor, indicando a formação de uma estrutura mais desorganizada, como esperado para óxidos mistos derivados de hidrotalcitas. Os picos ficaram com valores de 2θ iguais a 37,08° (111), 45,02° (200) e 65,82° (220), semelhante aos encontrados no trabalho de Touhara *et al.* (2015) para o óxido de níquel. Nesse estudo, os picos de óxido de alumínio e aluminato de níquel não foram identificados por essa análise.

Na Figura 2, tem-se os espectros de FT-IR obtidos para o precursor e o catalisador. O espectro de FT-IR da hidrotalcita mostra uma intensa banda de estiramento de O-H ao redor de 3400 cm⁻¹, relacionada à presença de grupos hidroxilas na estrutura lamelar e água interlamelar. Uma banda forte próxima de 1370 cm⁻¹ foi atribuída às vibrações vibratórias simétricas do grupo carboxilato do tereftalato presente entre as camadas, que equilibra a carga positiva das lamelas metálicas (6; 8).

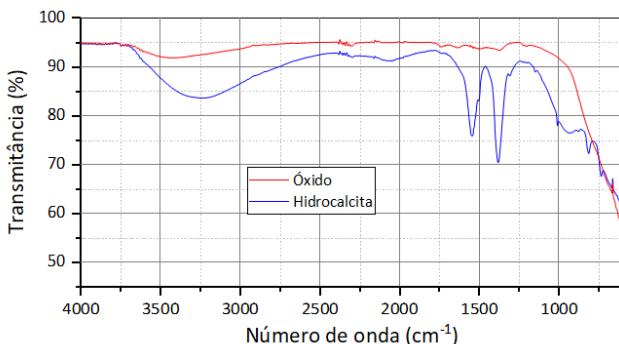


Figura 2. Espectros de FT-IR da hidrotalcita e do óxido misto obtido após a calcinação.

Outras bandas observadas entre 600–800 cm⁻¹ podem estar relacionadas às vibrações de ligações metal-oxigênio (M–O e M–OH) das camadas de hidróxidos. Após a calcinação, observa-se uma redução significativa da banda de O–H e o desaparecimento quase completo da banda de carboxilato, evidenciando a remoção dos íons interlamelares e a desidroxilação da estrutura (9).

Essas mudanças confirmam a desestruturação da fase lamelar e a formação de óxidos mistos metálicos. A presença residual de bandas associadas a ligações M–O sugere que os óxidos formados mantêm as interações entre os cátions metálicos, o que é essencial para aplicações que requerem alta estabilidade térmica e resistência à sinterização (5; 8).

É conhecido que a hidrotalcita possui três principais perdas de massa: a primeira, em temperaturas entre 100 °C e 200 °C que é referente a perda da água presente entre as camadas da estrutura; A segunda etapa, entre 200 e 450 °C, é atribuída à decomposição das hidroxilas que conformam as lamelas. Por fim, uma perda acentuada de massa próxima a 450–500 °C indica a destruição da estrutura lamelar e a decomposição do ânion de compensação, tereftalato, formando óxidos mistos (5; 10). Todas essas perdas de massa podem ser observadas na Figura 3.

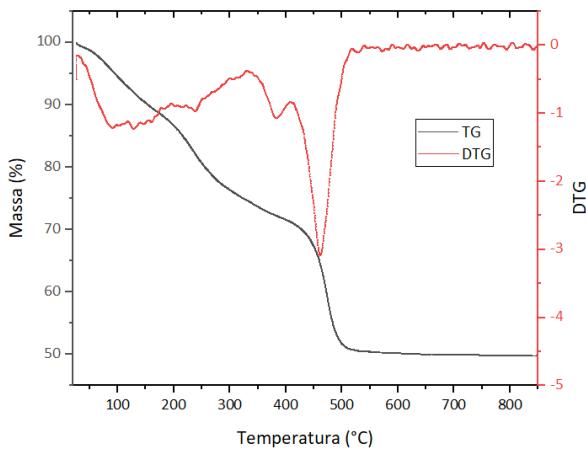


Figura 3. Curvas de Termogravimetria (TG) e Derivada da Termogravimetria (DTG) da hidrotalcita.

O pico de DTG mais intenso que ocorre ao redor de 450–500 °C reforça essa interpretação, indicando uma etapa principal de degradação térmica. Após essa temperatura, a curva de TG se estabiliza, sugerindo que o material remanescente é termicamente estável, característico de óxidos formados a partir da decomposição das hidrotalcitas. Esse comportamento é ideal para aplicações catalíticas em condições severas, como reações de reforma a vapor ou liquefação hidrotérmica de biomassa, onde os catalisadores devem resistir a altas temperaturas sem sofrer degradação estrutural (5). Dessa forma, optou-se por realizar a calcinação do catalisador a 550 °C, uma vez que essa é a temperatura na qual a hidrotalcita se transforma completamente em óxido misto.

A redução do óxido metálico é considerada quando o material adsorve H₂, pois o hidrogênio funciona como agente redutor, reagindo com o oxigênio do óxido para formar água (H₂O). O resultado da análise de TPR é apresentado na Figura 4. Nela, é possível observar três regiões distintas de redução. A primeira, com um pequeno pico abaixo de 300 °C, sugere a presença de espécies de NiO fracamente ligadas ou livres, que são mais facilmente reduzidas. Em seguida, observa-se uma região de redução entre aproximadamente 450 °C e 650 °C, indicando a redução de espécies de NiO mais bem dispersas ou moderadamente interagidas com a matriz do óxido. O terceiro e mais intenso pico, com máximo próximo a 750 °C, é característico da redução de espécies fortemente ligadas, como o espinélio NiAl₂O₄, que requer temperaturas elevadas para ser reduzido devido à sua maior estabilidade térmica (7).

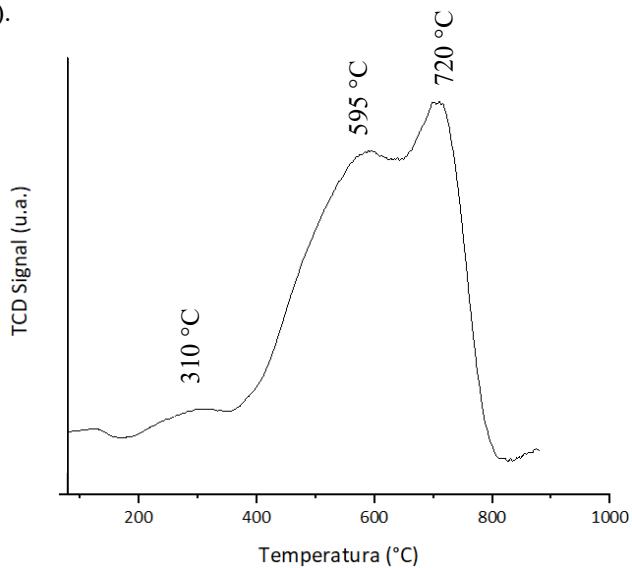


Figura 4. Perfil de Redução por H₂-TPR do Óxido Misto de NiAl.

HTL da biomassa

Dois conjuntos de experimentos em duplicata foram realizados: o primeiro utilizando apenas biomassa e solvente

(água destilada) e o segundo com a adição do catalisador. A temperatura ($300\text{ }^{\circ}\text{C}$), a pressão final (150 bar) e o tempo de reação (30 minutos) foram mantidos constantes em todas as bateladas. A média das massas, rendimentos e poder calorífico obtidos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores médios de massa e rendimento do bio-óleo na HTL.

Código	Pressão final (bar)	Rendimento (%)	Poder calorífico (MJ/kg)
AA300-0	150	$6,68 \pm 0,78$	28,35
AA300-C	150	$9,10 \pm 0,38$	24,68
AA300-30	160	8,18	-
AA300-30C	160	11,00	-

Observa-se que o uso do catalisador influenciou positivamente na produção de bio-óleo. A média de rendimento do bio-óleo aumentou de 6,68% (sem catalisador) para 9,07% (com catalisador), indicando que a presença do catalisador favoreceu a quebra da biomassa em produtos líquidos, aumentando a eficiência do processo de liquefação. Essa melhoria é desejável, pois o bio-óleo é a fração de maior interesse para a produção de biocombustíveis.

Esse aumento se deve por conta da presença de sítios de Ni que favorecem reações de hidrogenação e estabilização de radicais livres formados durante a liquefação, enquanto a fase de Al contribui para reações de quebra de ligações C–O de lignina e celulose (4).

Ao avaliar o poder calorífico obtido pelo DSC, os bio-óleos obtidos nos ensaios AA300-0 e AA300-C apresentaram poderes caloríficos significativamente superiores ao da biomassa original (14,42 MJ/kg), com valores de 28,35 MJ/kg e 24,68 MJ/kg, respectivamente. Isso demonstra que o processo de liquefação hidrotérmica concentrou a fração energética da biomassa, tornando os bio-óleos produtos mais atrativos do ponto de vista energético.

Apesar de o bio-óleo obtido sem catalisador (AA300-0) apresentar o maior poder calorífico, o bio-óleo com catalisador (AA300-C) mostrou um rendimento significativamente maior ($9,10 \pm 0,38\%$) em comparação ao sem catalisador ($6,68 \pm 0,78\%$). Isso sugere que, embora o catalisador possa ter promovido a formação de compostos oxigenados que reduzem ligeiramente o poder calorífico, ele também favoreceu a conversão da biomassa, resultando em maior quantidade de produto. Portanto, a escolha entre maior densidade energética ou maior rendimento dependerá da aplicação desejada, sendo que o uso de catalisador pode

representar uma vantagem na produção total de energia recuperada.

Tal resultado pode ser corroborado ao observar os resultados de FT-IR das amostras de bio-óleo (Figura 5).

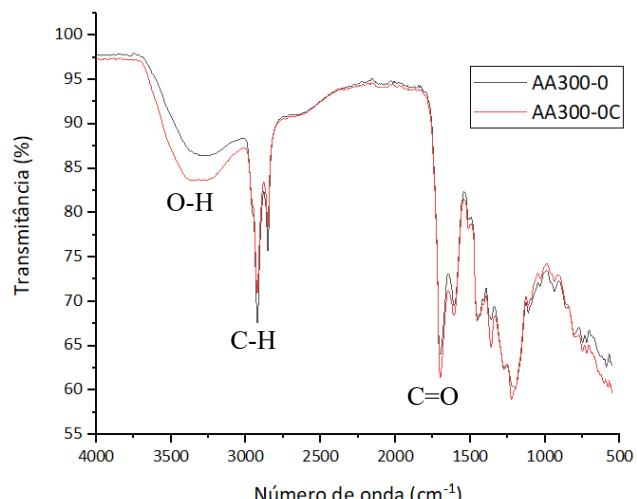


Figura 5. Espectros de FT-IR das amostras de bio-óleo com e sem catalisador para 1h de tempo de reação.

Ao avaliar o espectro obtido, é possível ver valores de transmittância consideráveis para picos em torno de 3300 cm^{-1} , 2900 cm^{-1} , 1600 cm^{-1} , e uma faixa maior de picos entre 1000 cm^{-1} e 1400 cm^{-1} . Esses picos comumente são associados ao estiramento de ligações O-H, estiramento de ligações C-H, ligações C=O e óxidos metálicos, respectivamente. Esses picos indicam a presença de substâncias como ácidos carboxílicos, ésteres, álcoois, compostos alifáticos, aldeídos, cetonas entre outros. A principal diferença observada no gráfico está nos valores de transmittância dos estiramentos O-H, que são menores para o bio-óleo com catalisador. Isso sugere uma maior presença de compostos oxigenados nesse bio-óleo, possivelmente devido à maior degradação da lignina promovida pelo catalisador — o que também explicaria seu maior rendimento. Como a lignina é precursora de compostos oxigenados, especialmente fenólicos, sua maior quebra resulta em produtos mais oxigenados, os quais tendem a reduzir o poder calorífico devido à presença de oxigênio em suas estruturas (1).

A influência do tempo de reação no rendimento da hidroliquefação térmica foi avaliada comparando-se os resultados obtidos com 0 e 30 minutos de tempo efetivo de reação. Observou-se que o aumento do tempo resultou em uma elevação do rendimento, tanto na ausência quanto na presença de catalisador. Sem o uso de catalisador, o rendimento aumentou de $6,68 \pm 0,78\%$ (AA300-0) para 8,18% (AA300-30) com o acréscimo de 30 minutos de reação. Da mesma forma, nas amostras com catalisador, o rendimento passou de $9,10 \pm 0,38\%$ (AA300-C) para 11,00% (AA300-30C). Esses resultados indicam que o prolongamento do tempo de reação favorece a conversão da

biomassa em bio-óleo, independentemente da presença do catalisador, embora o catalisador potencialize ainda mais esse efeito.

Embora o uso do catalisador tenha resultado em um aumento de rendimento, é necessário reavaliar os parâmetros da HTL para compreender as causas do rendimento ainda tão baixo para essa biomassa. Silva et al. (2024) relataram, no pior ponto do planejamento fatorial, um rendimento de 20,1% para a HTL de cana-de-açúcar, cuja composição é semelhante à do açaí — valor que é mais que o dobro do obtido neste trabalho mesmo com o uso do catalisador. Essa diferença pode ser associada ao maior teor de lignina nas amostras do caroço de açaí que as de bagaço de cana, pois esse composto apresenta maiores dificuldade para quebrar as ligações. Assim, torna-se essencial revisar fatores-chave da HTL, como a temperatura de reação e adição de co-solvente, entre outros, com o objetivo de aumentar esse rendimento.

Conclusões

A liquefação hidrotérmica do caroço de açaí, utilizando catalisadores de óxidos mistos de NiAl, mostrou-se uma estratégia promissora para a conversão de resíduos lignocelulósicos em produtos com valor energético agregado. O processo resultou em bio-óleos com poderes caloríficos significativamente superiores ao da biomassa original, alcançando até 28,35 MJ/kg, o que evidencia a eficiência da concentração de energia promovida pela HTL. Além disso, a presença do catalisador favoreceu um aumento no rendimento da fase líquida, indicando maior conversão da biomassa sob as condições avaliadas.

As análises térmicas e estruturais demonstraram que o catalisador passou por transformações típicas de hidrotalcitas calcinadas, formando óxidos mistos termoestáveis com potencial para suportar reações em condições severas. A formação de espécies redutíveis em diferentes faixas de temperatura, conforme indicado pelo perfil de TPR, reforça a presença de sítios de níquel variados, que podem beneficiar diferentes rotas catalíticas.

Futuros trabalhos serão conduzidos com o objetivo de otimizar ainda mais o rendimento e a qualidade do bio-óleo, incluindo a variação da proporção biomassa:solvente, testes com diferentes co-solventes, ajustes na carga de catalisador e a avaliação da sua reutilização em múltiplos ciclos reacionais. No entanto, os resultados obtidos até o momento já demonstram a efetividade do catalisador de óxido misto de NiAl na elevação do rendimento e na obtenção de bio-óleos com poder calorífico superior ao da biomassa original, evidenciando seu potencial para aplicações energéticas.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro concedido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) durante a realização desta pesquisa.

Referências

1. SILVA, R. S. et al. Hydrothermal Liquefaction of Sugarcane Bagasse and Straw: Effect of Operational Conditions on Product Fractionation and Bio-Oil Composition. *Energies*, 2024, v. 17, n. 21, p. 5439–5439.
2. MIRANDA, L. DE V. A. et al. Descarte e destino final de caroços de açaí na Amazônia Oriental - Brasil. *Ambiente & Sociedade*, 2022, v. 25.
3. SANTOS, M. M.; PASOLINI, F. S.; COSTA, A. P. O. Caracterização físico-química do caroço e da fibra do açaí (*Euterpe oleracea mart.*) via métodos clássicos e instrumentais. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 2023, v. 9, n. 2, p. 143–160.
4. SCARSELLA, M. et al. Heterogeneous catalysts for hydrothermal liquefaction of lignocellulosic biomass: A review. *Biomass and Bioenergy*, 2020, v. 140, p. 105662.
5. SHEN, Z. et al. MgAl-LDH/LDO-Catalyzed Hydrothermal Deoxygenation of Microalgae for Low-Oxygen Biofuel Production. *ACS ES&T Engineering*, 2021, v. 1, n. 6, p. 989–999.
6. ARIAS, S. et al. Hydrogen-free deoxygenation of industrial vegetable oil waste using Ce, Zr-NiAl catalysts for second-generation biofuels production. *Molecular Catalysis*, 2022, v. 529, p. 112554.
7. TOUAHRA, F. et al. Effect of the Ni/Al ratio of hydrotalcite-type catalysts on their performance in the methane dry reforming process. *Applied Petrochemical Research*, 2015, v. 6, n. 1, p. 1–13.
8. MALIŠOVÁ, M. et al. FTIR study of hydrotalcite. *Acta Chimica Slovaca*, 2018, v. 11, n. 2, p. 147–156.
9. NGUYEN, Q. T. et al. Synthesis, structural analysis and photocatalytic ability of novel Mg-Al-Ag and Mg-Al-Ag-Zn hydrotalcite-like compounds. *Materials Today Communications*, 2024, v. 41, p. 110239–110239.
10. GUO, Z. et al. Insight into the role of metal/oxide interaction and Ni availabilities on NiAl mixed metal oxide catalysts for methane decomposition. *Applied Catalysis A, General*, 2018, v. 555, p. 1–11.