

11º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO CATALISADOR FERRITA DE MAGNÉSIO (MgFe_2O_4) NO CRAQUEAMENTO CATALÍTICO DOS VAPORES DE PIROLÍSE DE BIOMASSA PARA PRODUÇÃO DE BIO-ÓLEO

AUTORES:

Tailane Hauschild¹, Gabriela Alves Zorzi², Tania Maria Basegio¹, Luís António da Cruz Tarelho³, Carlos Pérez Bergmann¹

INSTITUIÇÃO:

Bolsista PRH-13.1 UFRGS ANP, tailane.hauschild@ufrgs.br, ¹Departamento de Materiais (DEMAT)/Escola de Engenharia/Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), ²Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC)/Escola de Engenharia/Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), ³Department of Environment and Planning & Centre for Environmental and Marine Studies, University of Aveiro, Portugal

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO CATALISADOR FERRITA DE MAGNÉSIO (MgFe_2O_4) NO CRAQUEAMENTO CATALÍTICO DOS VAPORES DE PIRÓLISE DE BIOMASSA PARA PRODUÇÃO DE BIO-ÓLEO

Resumo

Neste trabalho avaliou-se a influência do catalisador de ferrita de magnésio (MgFe_2O_4) nas propriedades do bio-óleo produzido por pirólise catalítica face ao bio-óleo produzido por pirólise térmica. Para isso, a MgFe_2O_4 foi suportada em cilindros porosos comerciais à base de Al_2O_3 por síntese de combustão em solução. Foram realizados ensaios de pirólise térmica e ensaios com o suporte de alumina, como condição de referência na avaliação do efeito do catalisador sobre os produtos da pirólise catalítica (*ex-situ*). Em todos os ensaios de pirólise realizou-se a análise gravimétrica dos produtos (carbonizado, bio-óleo, gás). Relativamente ao bio-óleo, foi feita a separação em fração aquosa e fração pesada, e foi determinado o conteúdo de água dessas duas frações. Por outro lado, a fração pesada do bio-óleo também foi caracterizada quanto a composição elementar e poder calorífico. A produção média de bio-óleo foi de 60 e 58,5 wt.% para pirólise térmica e pirólise catalítica, respectivamente. A concentração de H_2O no bio-óleo da pirólise catalítica foi ligeiramente mais elevada face ao bio-óleo da pirólise térmica, passando de 13,04 a 13,58 wt.% na fração pesada, e de 49,18 a 51,27 wt.% na fração aquosa do bio-óleo. A fração pesada do bio-óleo (em base seca) produzido por pirólise térmica apresentou 77,29 wt.% de carbono, 2,17 wt.% de nitrogênio, 8,64 wt.% de hidrogênio, e 11,90 wt.% de oxigênio, e a fração pesada produzida por pirólise catalítica apresentou uma variação entre 68,32 a 77,79 wt.% de carbono, 1,37 a 2,40 wt.% de nitrogênio, 9,18 a 9,25 wt.% de hidrogênio e 11,57 a 21,07 wt.% de oxigênio. Para a fração pesada do bio-óleo da pirólise catalítica, o poder calorífico superior (PCS) foi 37,75 MJ/kg bio-óleo_(base seca) e o poder calorífico inferior (PCI) foi 30,06 MJ/kg bio-óleo_(base tal e qual), e são ligeiramente superiores aos observados na pirólise térmica, 36,90 MJ/kg bio-óleo_(base seca) para o PCS e 29,93 MJ/kg bio-óleo_(base tal e qual) para o PCI.

Palavras-chave: catalisador, ferrita de magnésio, pirólise, bio-óleo.

Abstract

The influence of magnesium ferrite (MgFe_2O_4) catalyst on the properties of bio-oil produced by catalytic pyrolysis against bio-oil produced by thermal pyrolysis was evaluated. For this, MgFe_2O_4 was supported in commercial porous cylinders based on Al_2O_3 by synthesis of combustion in solution. Thermal pyrolysis tests and tests with alumina support were performed as a reference condition in the evaluation of the effect of the catalyst on the products of the catalytic pyrolysis (*ex-situ*). Gravimetric analysis of pyrolysis products (char, bio-oil, gas) was made. In all pyrolysis tests, the gravimetric analysis of the products (char, bio-oil, gas) was performed. Regarding bio-oil, a separation was made in aqueous fraction and heavy fraction, and the water content of these two fractions was determined. The heavy fraction of the bio-oil was also characterized for elemental composition and calorific value. The average bio-oil production was 60 and 58.5 wt.% for thermal pyrolysis and catalytic pyrolysis, respectively. The H_2O content of bio-oil from catalytic pyrolysis was higher compared to bio-oil from thermal pyrolysis, increasing from 13.04 to 13.58 wt.% in the heavy fraction and from 49.18 to 51.27 wt.% in the aqueous fraction. The heavy fraction of bio-oil (in dry basis) produced by thermal pyrolysis had 77.29 wt.% carbon, 2.17 wt.% nitrogen, 8.64 wt.% hydrogen, and 11.90 wt.% oxygen, and the

heavy fraction produced by catalytic pyrolysis showed a variation between 68.32 to 77.79 wt.% of carbon, 1.37 to 2.40 wt. % of nitrogen, 9.18 to 9.25 wt.% of hydrogen and 11.57 to 21.07 wt.% of oxygen. For the heavy fraction of bio-oil from catalytic pyrolysis, the Higher Heating Value (HHV) was 37.75 MJ/kg bio-oil_(dry basis) and the Lower Heating Value (LHV) was 30.06 MJ/kg bio-oil_(wet basis), and are slightly higher than those observed in thermal pyrolysis, 36.90 MJ/kg bio-oil_(dry basis) for HHV and 29.93 MJ/kg bio-oil_(wet basis) for LHV.

Keywords: catalyst, magnesium ferrite, pyrolysis, bio-oil.

Introdução

Na corrida desesperada para neutralizar as emissões de carbono de origem fóssil, a busca por fontes energéticas de caráter sustentável tem se tornado constante, e uma forma de mitigar os efeitos das alterações climáticas. Neste cenário, a biomassa é reconhecida como uma alternativa adequada e sustentável, na perspectiva da geração de vetores energéticos alternativos de origem renovável, além de ser considerada um recurso neutro em emissões de carbono.

Dentre as soluções que têm vindo a ganhar dimensão no contexto da utilização da biomassa como biocombustível, encontra-se a conversão em vetores energéticos por tecnologia de pirólise. Entre esses vetores energéticos encontra-se o bio-óleo, este representa um importante produto intermédio que pode ter um elevado valor agregado, por exemplo, para ser integrado como matéria-prima alternativa ao petróleo em refinarias convencionais para a síntese de combustíveis líquidos (por exemplo, gasolina, diesel) (NO, 2014). Ademais, o bio-óleo pode ser utilizado como combustível em caldeiras/fornos industriais (LEHTO et al., 2014) ou convertido em etanol e biodiesel (KANAUJIA et al., 2014).

Contudo, a utilização direta de bio-óleo é significativamente desafiada por sua baixa qualidade como combustível associada as suas características indesejáveis, como alto teor de água e oxigênio, acidez e instabilidade química durante o armazenamento e transporte (YANG; KUMAR; HUHNKE, 2015). Relativamente aos métodos de melhoria da qualidade do bio-óleo, os maiores esforços têm sido dedicados ao estudo do craqueamento catalítico dos vapores de pirólise. No entanto, os custos de produção de alguns destes materiais e a desativação do catalisador devido à formação de coque e à contaminação, p.e., com enxofre, cloro, e álcalis é um desafio significativo para aplicações em largas escalas.

Torna-se, portanto, imperativo desenvolver catalisadores com baixo custo de produção e com características inovadoras que mantenham este material ativo por mais ciclos para aplicação no processo de pirólise de biomassa, de modo a melhorar o desempenho do processo na produção de bio-óleo. Neste sentido, os catalisadores à base Fe, um material abundante, são referidos como sendo usados para melhorar o desempenho da produção de bio-óleo em processo de pirólise e apresentam-se como materiais de baixo custo. Um exemplo desses materiais é a ferrita de magnésio (MgFe_2O_4), cujas características catalíticas podem ser atribuídas às interessantes propriedades magnéticas, elétricas, estabilidade química e térmica. Além disso, a ferrita de magnésio é considerada um potencial catalisador com bom desempenho, particularmente, para reduzir o teor de água no bio-óleo obtido por pirólise catalítica de biomassa (ATANDA et al., 2020).

Diante do exposto, este trabalho tem como motivação promover o desenvolvimento científico e inovação tecnológica de materiais visando melhorar a qualidade do bio-óleo em termos energéticos. Para tanto, o objetivo geral foi avaliar a influência do catalisador de ferrita de magnésio (MgFe_2O_4), suportado em uma estrutura sólida porosa a base de alumina (Al_2O_3), nas

propriedades do bio-óleo produzido por pirólise catalítica face ao bio-óleo produzido por pirólise térmica.

Metodologia

Para atingir o objetivo geral proposto neste trabalho foram concretizadas um conjunto de etapas, tal como se representa na Figura 1. Na Etapa 1 procedeu-se a concepção, montagem e operacionalização de uma unidade termoquímica em escala de bancada para estudo de pirólise térmica e catalítica (Figura 2). Na Etapa 2 foi sintetizado e caracterizado o catalisador de ferrita de magnésio suportado em estrutura porosa a base de alumina ($\text{MgFe}_2\text{O}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$). Por conseguinte, na Etapa 3, foram realizados os experimentos de pirólise térmica e catalítica e a análise gravimétrica dos produtos de pirólise de pinus (biochar, bio-óleo, gás). Nesta última etapa, também procedeu-se à caracterização do bio-óleo, particularmente da fração pesada, com vistas a avaliar a influência do catalisador em termos energéticos.

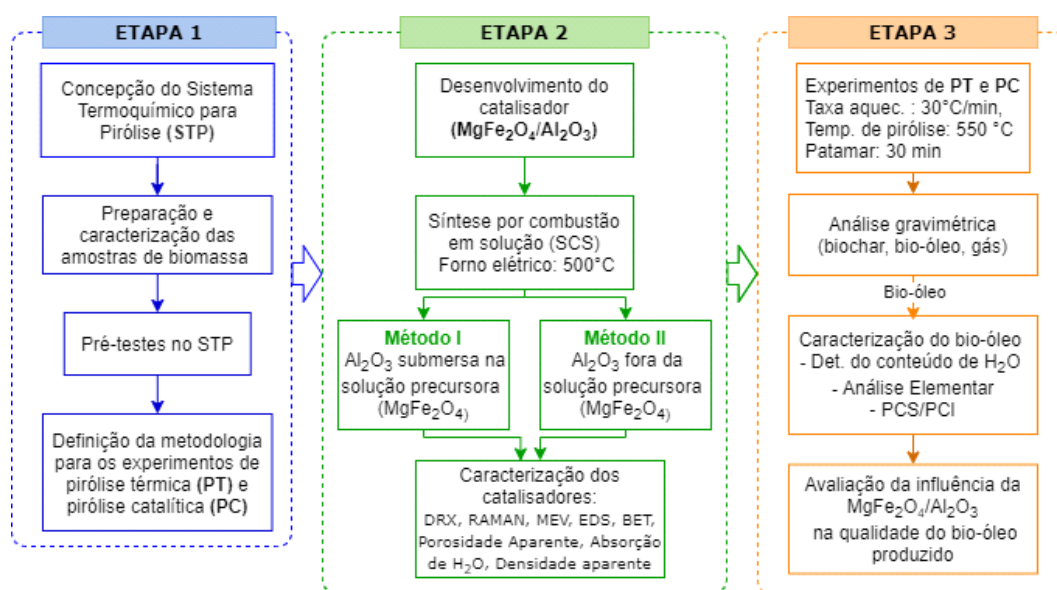


Figura 1 - Fluxograma com as etapas desenvolvidas no presente trabalho.

Neste trabalho, as experiências de pirólise foram realizadas com uma taxa de aquecimento de 30°C/min, uma temperatura de processo de 550 °C e tempo de patamar de 30 minutos (tempo que o reator era mantido a 550 °C). Estes parâmetros operatórios aplicavam-se a ambas as zonas de aquecimento do forno, Forno de Pirólise (Figura 2 (e)) e Forno de Catálise (Figura 2 (f)). Para assegurar uma atmosfera inerte no reator de pirólise e catalítico, foi mantido durante todo o ensaio uma vazão de 100 ml_{PTN}/min de N₂ a passar por dentro dos reatores. A purga de gás evitou a entrada de O₂ e promoveu o arraste dos vapores de pirólise através dos reatores.

O procedimento para os experimentos de pirólise catalítica foi análogo ao utilizado para a pirólise térmica, com apenas a diferença da introdução do catalisador no reator de quartzo localizado a jusante do reator de pirólise. Para cada experimento de pirólise catalítica, foram utilizadas três unidades (em série) da estrutura de alumina porosa impregnadas com a ferrita de magnésio ($\text{MgFe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$). A aplicação dos catalisadores para o craqueamento dos vapores de pirólise ocorreu dentro do mesmo reator da pirólise, porém separados fisicamente da biomassa, configurando assim a metodologia *ex-situ*. Informações adicionais do método de aplicação dos catalisadores e da configuração da unidade termoquímica desenvolvida, podem ser verificados em Hauschild et al. (2022).

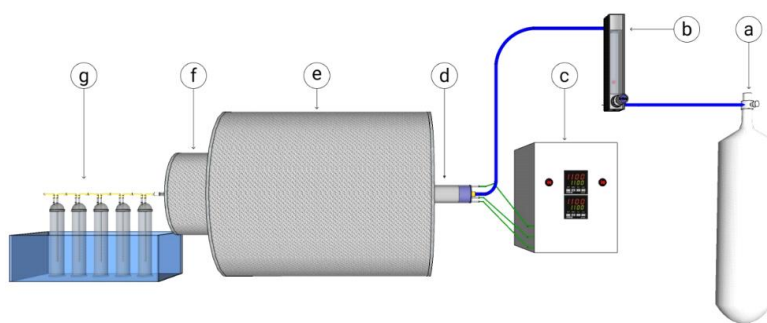


Figura 2 - Esquema do sistema de pirólise: (a) cilindro de N₂; (b) rotômetro para controle de vazão do N₂; (c) unidade de controle de temperatura composta por dois controladores independentes, do forno de pirólise e da mufla catalítica; (d) reator de pirólise em quartzo; (e) forno de pirólise (FP), (f) forno de catálise (FC); (g) sistema de condensação dos vapores de pirólise e de coleta de bio-óleo.

Para a condição de experimento apresentada, foram realizados três ensaios de pirólise térmica, e três ensaios com o suporte de alumina pura, que serviram como condição de referência para, posteriormente, avaliar o efeito do catalisador sobre os produtos de pirólise. Na Tabela 1 estão apresentadas as condições operatórias e a identificação dos experimentos.

Tabela 1 - Condições operatórias utilizadas nas experiências de pirólise, e identificação dos experimentos.

Condições operatórias pirólise térmica e catalítica	Referências	Experimento de pirólise
30 °C/min 550 °C 30 min patamar	PT	Térmica
	PA	Catalítica: Al ₂ O ₃ pura
	PFA _{cfs}	Catalítica: catalisador FA (MgFe ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃ , com combustão fora da solução de formação)
	PFA _{cds}	Catalítica: catalisador FA (MgFe ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃ , com combustão dentro da solução de formação)

A determinação da concentração de água na fração aquosa e na fração pesada do bio-óleo, foi realizada pelo método Karl Fischer volumétrico. Em virtude da fração aquosa das amostras de bio-óleo apresentar uma concentração de água acima de 50 wt.%, somente a fração pesada do bio-óleo foi caracterizada quanto a composição elementar. Dessa forma, a fração pesada do bio-óleo produzido nos experimentos de pirólise térmica e pirólise catalítica foi caracterizada quanto a concentração de água e composição elementar.

A partir dos resultados da análise elementar também foi estimado o Poder Calorífico Superior PCS (MJ/kg) da fração pesada do bio-óleo, utilizando a Equação 1 [Channivala e Parikh, 2002] (CHANNIWALA; PARIKH, 2002). Porém, sem considerar a concentração de enxofre (W_S) e de cinzas (W_{CZ}) no bio-óleo, que tomaram o valor zero.

$$PCS = 0,3491 \times w_C + 1,1783 \times w_H + 0,1005 \times w_S - 0,10340 \times w_O - 0,0151 \times w_N + 0,0211 \times w_{CZ}$$

(Equação 1)

onde, w_C, w_H, w_O e w_N representam a concentração (wt.%) de C, H, O e N no bio-óleo (sem água), respectivamente.

Logo, a partir da correlação entre o poder calorífico inferior de um combustível (PCI) e o poder calorífico superior (PCS) desse combustível, foi possível determinar o PCI da fração pesada do bio-óleo. Para isso foi aplicado a Equação 2,

$$PCI = PCS - 2,5 \times (W + 9H) \quad (\text{Equação 2})$$

onde, PCS em MJ/kg; PCI em MJ/kg (combustível com água); 2,5 é o valor de entalpia de vaporização da água em MJ/kg; W é a % em massa da água contida no combustível, H é a % em massa do hidrogênio contido no combustível.

Resultados e Discussão

Foi possível sintetizar o catalisador ferrita de magnésio (MgFe_2O_4) diretamente no suporte poroso a base de alumina (cilindros de Al_2O_3). Para os três difratogramas, Figura 3, é possível observar a presença de uma única fase, que é corresponde a MgFe_2O_4 . Os tamanhos dos cristalitos calculados a partir dos dados de difração apresentaram-se análogos para as três amostras de pós. Os valores calculados foram 28nm, 29nm e 29nm para as amostras MgFe_2O_4 _Pó-S1, FA_{cfs} _Pó e FA_{cds} _Pó, respectivamente.

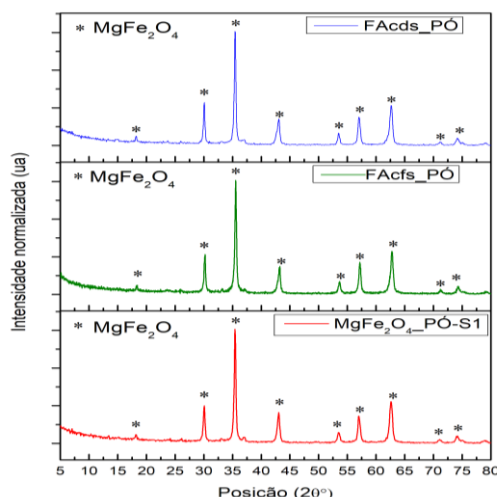


Figura 3 - Espectro de DRX das amostras de pó de referência na condição de síntese da solução sem imersão do suporte do catalisador (MgFe_2O_4 _Pó-S1), pó da síntese da solução com imersão do suporte do catalisador para o caso de combustão com suporte fora da solução (FA_{cfs} _Pó) e combustão com suporte na solução (FA_{cds} _Pó).

Os resultados da espectroscopia Raman apresentado em Hauschild (2021), corroboraram com os resultados da formação de ferrita de magnésio para os dois tipos de catalisadores. Bem como, a partir da análise MEV/EDS observou-se a predominância da concentração de Fe, em detrimento do Al na superfície dos catalisadores suportados, e o aumento de concentração de Mg, relativamente ao observado para o suporte de alumina. Assim, infere-se que foi possível suportar o material catalítico na superfície do suporte de alumina. As imagens das análises MEV/EDS podem ser verificadas em Hauschild (2021).

Relativamente a área superficial específica (BET), observou-se que os dois catalisadores suportados nos cilindros a base de alumina apresentavam valores de 5,34 e 5,68 m^2/g , para o FA_{cfs} e FA_{cds} , respectivamente, sendo superiores ao valor 4,45 m^2/g observado para os suportes de alumina.

A partir da confirmação da obtenção do catalisador preconizado, passou-se a etapa de aplicação dos materiais produzidos (FA_{cfs} e FA_{cds}), nas experiências de pirólise catalítica.

Na Figura 4, apresenta-se as frações aquosas e frações pesadas das amostras de bio-óleo produzidas a partir da pirólise térmica e pirólise catalítica de serragem de pinus dos quatro conjuntos de condições operatórias (PT, PA, PFA_(cds) e PFA_(cdf), Tabela 1) de pirólise.

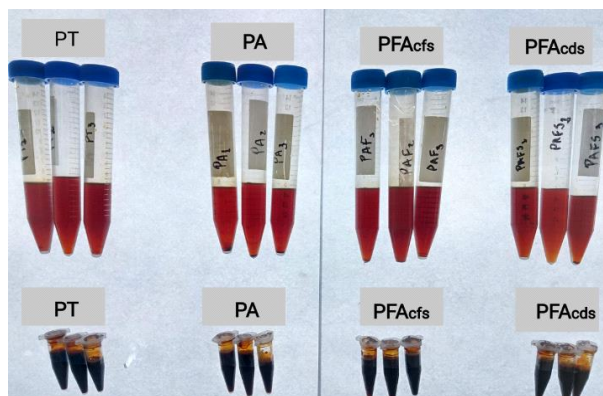


Figura 4 – Frações aquosas (acima) e frações pesadas (abaixo) das amostras de bio-óleo produzidas a partir da pirólise térmica e pirólise catalítica de serragem de pinus. Referência das amostras de acordo com a Tabela 1.

Os resultados dos rendimentos mássicos do biochar, bio-óleo e gases permanentes dos quatro conjuntos de condições operatórias de pirólise (PT, PA, PFA_(cds) e PFA_(cdf)) são apresentados na Figura 5. Os valores são expressos em porcentagem de massa relativos à amostra de biomassa utilizada em base seca.

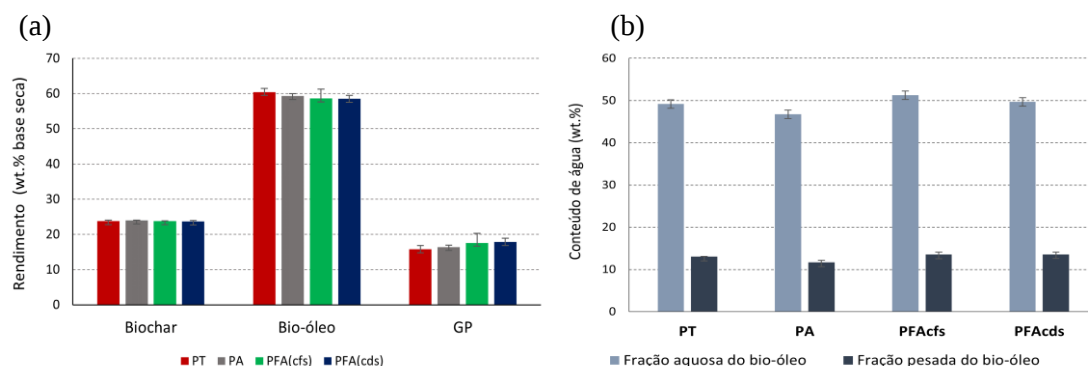


Figura 5 – (a) Análise gravimétrica: rendimentos médios dos produtos de pirólise, biochar, bio-óleo e gases permanentes (GP) da pirólise térmica (PT), pirólise catalítica com alumina (PA), e pirólise catalítica PFA_(cds) e PFA_(cfs). Os valores são expressos em porcentagem de massa relativos à biomassa em base seca (wt%, base seca); (b) Conteúdo de água (wt.%) nas frações aquosa e pesada do bio-óleo produzido por pirólise térmica e catalítica.

A produção média de bio-óleo foi de 60,0 e 58,5 wt.% para pirólise térmica e pirólise catalítica, respectivamente. O decréscimo na produção de bio-óleo durante a pirólise catalítica face ao observado na pirólise térmica (ver Figura 5 (a)), pode ser interpretado como indicativo de que o catalisador pode ter promovido a quebra das macromoléculas dos vapores de pirólise em moléculas menores, durante as experiências na pirólise PA, PFA_(cfs) e PFA_(cds). Esta possível quebra das moléculas, pode ter favorecido a geração de produtos gasosos leves como H₂O, CO₂, CO, H₂, CH₄, e, outros hidrocarbonetos leves (C_xH_y). De fato, observa-se que a geração de compostos gasosos designados por gases permanentes (CO₂, CO, H₂, CH₄, outros hidrocarbonetos leves (C_xH_y)), por estarem na fase gasosa à temperatura e pressão ambiente, foi superior durante

a pirólise catalítica em comparação com a pirólise térmica (ver gases permanentes (GP) na Figura 5 (a)).

A concentração de H_2O no bio-óleo da pirólise catalítica foi mais elevada face ao bio-óleo da pirólise térmica, passando de 13,04 a 13,58 wt.% na fração pesada e de 49,18 a 51,27 wt.% na fração aquosa do bio-óleo (ver Figura 5 (b)). Isso pode ser explicado como resultando do fato de um dos efeitos observados no craqueamento catalítico dos vapores de pirólise ser relativo à desoxigenação com formação de H_2O como subproduto no bio-óleo.

Relativamente a concentração elementar CNHO (Figura 6 (a)), a fração pesada do bio-óleo (em base seca) produzido por pirólise térmica apresentou 77,29 wt.% de carbono, 2,17 wt.% de nitrogênio, 8,64 wt.% de hidrogênio, e 11,90 wt.% de oxigênio, e a fração pesada produzida por pirólise catalítica apresentou uma variação entre 68,32 a 77,79 wt.% de carbono, 1,37 a 2,40 wt.% de nitrogênio, 9,18 a 9,25 wt.% de hidrogênio e 11,57 a 21,07 wt.% de oxigênio.

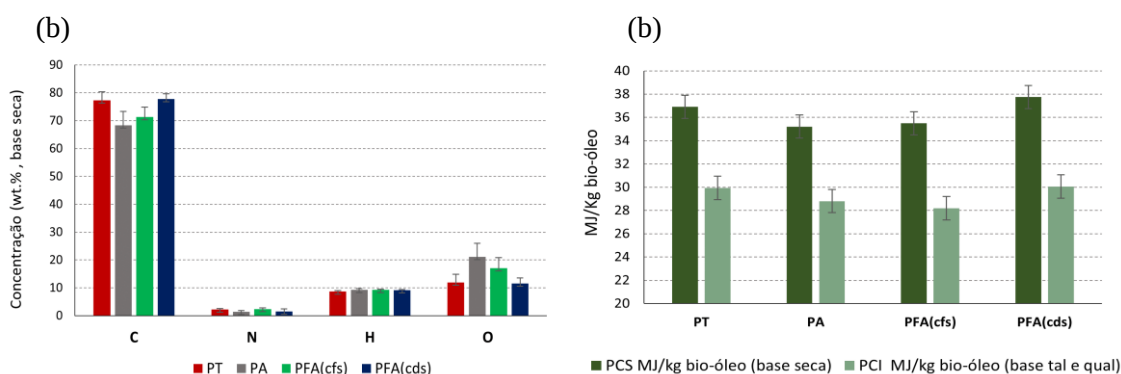


Figura 6 – (a) Concentração elementar CNHO (expresso em wt.%, base seca) na fração pesada do bio-óleo produzido por pirólise térmica e catalítica; **(b)** Poder calorífico superior PCS (expresso em MJ/kg bio-óleo, em base seca) e poder calorífico inferior PCI (expresso em MJ/kg bio-óleo, em base tal e qual) do bio-óleo produzido por pirólise térmica e catalítica.

Verifica-se, que o conteúdo de carbono na fração pesada do bio-óleo produzido por pirólise térmica (PT) é superior ao conteúdo de carbono produzido na pirólise catalítica PA e PFA_(cfs). Por outro lado, verifica-se um aumento da contração de carbono na pirólise catalítica PFA_(cds) face a pirólise catalítica PA e PFA_(cfs). Contudo, não foi observado uma influência clara dos catalisadores no que se refere a concentração de hidrogênio na fração pesada do bio-óleo.

Consequentemente, em razão da concentração do oxigênio ser determinada por diferença relativamente aos outros elementos químicos CNH, o seu comportamento é complementar ao observado para o carbono. Isto é, a concentração de oxigênio durante a pirólise catalítica PA e PFA_(cfs) é superior a concentração observada na pirólise térmica. Para os diferentes catalisadores a concentração de oxigênio diminui do PA para PFA_(cfs) e deste para o PFA_(cds).

No que se refere ao poder calorífico da fração pesada do bio-óleo obtido por pirólise catalítica (Figura 6 (b)), o poder calorífico superior (PCS) foi 37,75 MJ/kg bio-óleo_(base seca) e o poder calorífico inferior (PCI) foi 30,06 MJ/kg bio-óleo_(base tal e qual), valores estes que são ligeiramente superiores aos observados na pirólise térmica, 36,90 MJ/kg bio-óleo_(base seca) para o PCS e 29,93 MJ/kg bio-óleo_(base tal e qual) para o PCI. Este ligeiro acréscimo do PCS e PCI para a fração pesada do bio-óleo obtido a partir da PFA_(cds) está relacionado com o ligeiro aumento nas concentrações de H e C, uma menor concentração de O, e uma menor concentração de H_2O .

Conclusões

O catalisador MgFe_2O_4 sintetizado e suportado em cilindro poroso a base de alumina (Al_2O_3) foi produzido e aplicado com êxito no craqueamento dos vapores de pirólise. Relativamente a produção de bio-óleo, os resultados indicam a influência tanto dos catalisadores suportados como do próprio suporte de alumina, particularmente na formação de água, que pode ser extraída do bio-óleo, e num ligeiro aumento no poder calorífico do bio-óleo. Contudo, para uma compreensão mais profunda do efeito do catalisador sobre as propriedades do bio-óleo, e dos processos catalíticos envolvidos, é necessário realizar uma análise mais detalhada do processo em trabalhos futuros.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de P, D&I da Resolução ANP nº 50/2015. Agradece-se à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) / Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior (MCTES) pelo apoio financeiro ao CESAM (UIDP/50017/2020+UIDB/50017/2020+LA/P/0094/2020), através de fundos nacionais, e o financiamento do projecto BioValChar - Valorização sustentável de biomassa residual para biochar, PCIF-GVB-0034-2019.

Referências Bibliográficas

ATANDA, L. *et al.* Hybridization of ZSM-5 with Spinel Oxides for Biomass Vapour Upgrading. **ChemCatChem**, Weinheim, v. 12, n. 5, p. 1403–1412, 2020.

CHANNIWALA, S. A.; PARIKH, P. P. A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. **Fuel**, v. 81, n. 8, p. 1051–1063, 1 maio 2002.

HAUSCHILD, T. Avaliação da influência do catalisador ferrita de magnésio (MgFe_2O_4), suportado em estrutura porosa a base de alumina, no crequeamento catalítico dos vapores de pirólise de biomassa para produção de bio-óleo. 2021 1-218f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021, Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/231556>

HAUSCHILD, T. *et al.* Desenvolvimento de um sistema de pirólise térmica e catalítica para a aplicação de novos catalisadores com vistas a melhoria do bio-óleo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS, 11., 2022, Belém.

KANAUJIA, P. K. *et al.* Review of analytical strategies in the production and upgrading of bio-oils derived from lignocellulosic biomass. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 105, p. 55–74, 1 jan. 2014.

LEHTO, J. *et al.* Review of fuel oil quality and combustion of fast pyrolysis bio-oils from lignocellulosic biomass. **Applied Energy**, v. 116, p. 178–190, 1 mar. 2014.

NO, S.-Y. Application of bio-oils from lignocellulosic biomass to transportation, heat and power generation—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 40, p. 1108–1125, 1 dez. 2014.

YANG, Z.; KUMAR, A.; HUHNKE, R. L. Review of recent developments to improve storage and transportation stability of bio-oil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 859–870, 1 out. 2015.