

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOCARVÃO OBTIDO A PARTIR DA
PIRÓLISE DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NÃO RECICLÁVEIS**DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.5.22.IV-014>Jéssica O. Freitas, Ana Flávia G. Almeida, Daniel B. Rezende, Camila N. C. Corgozinho, Renata C. S. Araújo
* Universidade Federal de Minas Gerais, jfof@ufmg.br**RESUMO**

O aumento da quantidade de resíduos sólidos urbanos (RSU) descartados pela população representa um grande problema econômico e ambiental da atualidade. O processo de pirólise consiste na degradação térmica de um material na ausência total ou parcial de oxigênio, gerando diversos produtos de grande aplicabilidade. Visando promover uma alternativa sustentável à acumulação de resíduos, o presente trabalho buscou realizar testes em um reator de pirólise utilizando resíduos sólidos urbanos que seriam destinados a aterros sanitários, oriundos de uma associação de catadores de material reciclável como matéria prima, variando os principais parâmetros de processo: tempo de reação (30 min ou 180 min), composição da matéria prima (RSU ou RSU + madeira) e meio de reação (com ou sem N₂). O foco foi na obtenção de biocarvão, por seu alto valor agregado e grande aplicabilidade. Os biocarvões obtidos da pirólise foram caracterizados, realizando-se testes gravimétricos (umidade, voláteis e cinzas), porcentagem de carbono fixo, análise termogravimétrica e espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier. Observou-se o tempo de pirólise de 30 min forneceu o melhor rendimento de biocarvões. Quanto ao meio de reação e composição de matéria prima, não se observaram grandes diferenças em relação ao rendimento. Com os dados das caracterizações, observou-se que os biocarvões gerados têm grande porcentagem de carbono fixo e baixo teor de cinzas, mostrando a qualidade do produto obtido. Quanto ao comportamento térmico das amostras analisadas, todos os biocarvões apresentaram um evento de degradação com temperatura de degradação máxima em 650 °C. Além disso, todas as amostras apresentaram comportamento térmico similar, descartando a influência das variáveis de processo na estabilidade térmica dos biocarvões. Na espectroscopia de infravermelho observou-se a presença de vários grupos funcionais como hidroxilas, ligações C=C e ligações C-O. A presença desses grupos foi atribuída a produtos que não foram degradados totalmente na pirólise, remanescentes nos biocarvões.

PALAVRAS-CHAVE: Biocarvão, Sustentabilidade, Pirólise, Resíduos Sólidos Urbanos.**ABSTRACT**

The increase in the amount of municipal solid waste (MSW) discarded by the population represents a major economic and environmental problem today. The pyrolysis process consists of the degradation of a material in the total or partial absence of oxygen, generating several products of great applicability. In order to promote a sustainable alternative to the accumulation of waste, the present work sought to carry out tests in a pyrolysis reactor using municipal solid waste, coming from an association of recyclable material collectors as raw material, varying the main process parameters: reaction time (30 min or 180min), raw material composition (MSW or MSW + wood) and reaction medium (with or without N₂). The focus was on obtaining biochar, due to its high added value and wide applicability. At the end, the biochars obtained from pyrolysis were characterized, performing gravimetric tests (moisture, volatiles and ash), percentage of fixed carbon, thermogravimetric analysis and infrared spectroscopy by Fourier transform. In the end, it was possible to conclude that with the time of 30 min, the best yield of biochars was obtained. As for the reaction medium and raw material composition, no major differences were observed in terms of yield. With the characterization data, it was observed that the biochars generated have a high percentage of fixed carbon and low ash content, showing the quality of the product obtained. As for the thermal behavior of the analyzed samples, the first degradation peak occurred at about 650 °C. In addition, all samples showed similar thermal behavior, ruling out the influence of the process variables considered on the thermal behavior. In the infrared spectroscopy, the presence of several functional groups such as hydroxyls, C=C groups and C-O bonds was observed. The presence of these groups was attributed to products that were not fully degraded in pyrolysis.

KEY WORDS: Biochar, Sustainability, Pyrolysis, Municipal Solid Waste.



INTRODUÇÃO

Pirólise vem do grego “decomposição pelo calor” e consiste na degradação térmica de um material na ausência total ou parcial de oxigênio, de modo a evitar a combustão dos produtos. O processo de pirólise gera três produtos: biocarvão, bio-óleo e gás de pirólise.

As porcentagens e rendimentos de cada um dos três produtos dependem de diversos fatores. Um dos principais é a temperatura. Baixas temperaturas (próximas a 300 °C) aumentam o rendimento de carvão, enquanto altas temperaturas (acima de 800 °C) favorecem a produção de gás. O tipo de reator a ser utilizado também influencia nas reações. O reator de leito fixo, como o utilizado neste trabalho, é um reator com uma tecnologia simples no qual não há movimentação da matéria-prima dentro do equipamento. Geralmente, operam com alto tempo de residência, baixa velocidade de gás e baixo transporte de cinzas, o que favorece a produção de carvão (Jahirul et al, 2012). O gás nitrogênio utilizado tem a função inertizar o meio e transportar os produtos voláteis para fora do reator (Aladin et al, 2021).

A matéria-prima do processo de pirólise pode variar e, neste trabalho, constitui-se de resíduo sólido urbano (RSU). Com o crescimento da população, a gestão desse tipo de resíduo vem se tornando uma questão crítica para o meio ambiente (Ławinska et al, 2022). Diversos estudos têm sido desenvolvidos com o objetivo de apresentar soluções ambientalmente corretas para o RSU. Dentro deste contexto, a pirólise representa uma alternativa interessante, por proporcionar o aproveitamento dos produtos obtidos no processo.

O produto líquido pode ser usado para a geração de energia em caldeiras e motores a combustão, por exemplo. Ademais, pode servir como matéria-prima para a produção de olefinas e aromáticos. Contudo, é um produto com baixa estabilidade e corrosivo, gerando a necessidade de melhorias para seu amplo uso. O maior rendimento em produto líquido é favorecido pela pirólise rápida, caracterizada por altas taxas de aquecimento, de temperatura e baixo tempo de residência (Zhou et al, 2021). Se a taxa de aquecimento for abaixo de cerca de 50 °C/minuto com uma temperatura final entre 400-600°C, tem-se a pirólise lenta (Aladin et al, 2021), que geralmente está associada à produção de biocarvão.

O biocarvão possui características de superfície interessantes, que permitem que ele seja utilizado para filtração, assim como para adsorção de contaminantes orgânicos e inorgânicos, principalmente após sua ativação. Além disso, pode ser utilizado como combustível sólido (poder calorífico de cerca de 18 MJ/kg) ou como matéria-prima para a produção de produtos químicos, de nanotubos de carbono e de aditivos de solo. Outra aplicação seria para o sequestro de carbono, com a adsorção de gases de efeito estufa (Amenaghawon et al, 2021).

O gás da pirólise pode ser usado como fonte de energia para o próprio reator de pirólise, além de em outros equipamentos, devido ao seu elevado poder calorífico (Amenaghawon et al, 2021). Além disso, pode ser utilizado como matéria-prima em sínteses de Fischer-Tropsch e em diversos outros processos.

A caracterização dos produtos da pirólise é uma etapa fundamental e diferentes ensaios físico-químicos são utilizados nesta etapa. Com os resultados para os diferentes parâmetros, tem-se indicativos de aplicação mais adequadas para os produtos. Para o biocarvão, produto estudado neste trabalho, técnicas gravimétricas são utilizadas para a determinação dos teores de carbono fixo, umidade, voláteis e cinzas. O teor de carbono fixo está diretamente ligado à qualidade do carvão, quanto maior sua porcentagem, melhor o material (CHEN et al., 2014). A análise termogravimétrica é utilizada para se conhecer o comportamento térmico dos materiais. Como o material analisado é um biocarvão, as informações a respeito de sua estabilidade térmica são de grande importância, podendo ser utilizadas para a determinação da temperatura de ativação, por exemplo. Já a espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) fornece informações sobre a estrutura química do biocarvão. Por ser proveniente de uma matéria prima heterogênea, o RSU, a análise da estrutura química resultante após o processo de pirólise permite várias conclusões a respeito do biocarvão obtido e suas possíveis aplicações.

OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho consiste no estudo da pirólise de resíduos sólidos urbanos coletados na Associação de Catadores de Materiais Recicláveis (Camar) da cidade de Mariana, Minas Gerais. Os resíduos coletados foram os que passaram pela triagem e teriam como destino o aterro sanitário, pois não poderiam ser comercializados como recicláveis devido a alguma contaminação ou restrições do mercado de recicláveis. Grandes volumes desses resíduos são gerados. Eles ocupam os aterros sanitários dos municípios, porém podem ter aplicabilidade em processos termoquímicos como a pirólise, gerando novos produtos e ganhos financeiros para a Associação. O foco deste trabalho foi na produção e caracterização do



biocarvão a partir da pirólise destes resíduos recicláveis não comercializados, utilizando-se diferentes condições de reação.

METODOLOGIA

Inicialmente foi realizada a coleta dos resíduos sólidos urbanos recicláveis não comercializados pela Associação de Catadores de Material Reciclável de Mariana (Camar). Os resíduos foram recolhidos tendo uma massa de 95,91 kg formada por diversos materiais como plásticos, papéis, tecidos, entre outros. Os resíduos foram separados por tipo de material, pesados e foi realizada a determinação de sua composição gravimétrica. A fração formada por metais, vidros, materiais cerâmicos e não pirolisáveis foi excluída e não utilizada nas etapas seguintes. A madeira foi mantida em separado. A seguir, os resíduos foram triturados em um triturador Shredder de 70 cavalos da fabricante TECSAN e, em seguida levados a um moinho de facas, para obtenção de menor granulometria.

Após esse pré-processamento, foram feitos os experimentos de pirólise. Os testes foram realizados em um reator de leito fixo no Laboratório de Processos Industriais (LPI) na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Uma foto do pirolisador utilizado é apresentada na Figura 1.



Figura 1: Pirolisador de leito fixo utilizado para os experimentos de pirólise.

A massa inicial de resíduos utilizada variou entre 119 a 175 gramas nos oito testes realizados. Nesses ensaios, variou-se as condições experimentais para três parâmetros: tipo de biomassa (RSU e RSU + madeira), meio de reação (com nitrogênio como gás de arraste e sem nitrogênio) e tempo de residência (30 e 180 minutos após estabilização da temperatura). A descrição de cada um dos ensaios é apresentada na Tabela 1.

A caracterização dos carvões gerados foi realizada por testes gravimétricos (umidade, voláteis e cinzas), análise termogravimétrica e espectrometria de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). Para cada amostra foram utilizados cadinhos de cerâmica com tampa e cerca de 1 g de amostra, previamente macerada e peneirada em peneira de 60 mesh. Os testes foram realizados subsequentemente, ou seja, para um mesmo cadinho, os testes de umidade, voláteis e cinzas foram realizados nessa ordem. Assim, foi possível avaliar a porcentagem de carbono fixo final de cada amostra em função da massa restante ao final das três etapas. O teste de umidade foi realizado em uma estufa de secagem na temperatura de 110°C (ASTM D3173/D3173M). As amostras ficaram um período de 1 hora na estufa, com os cadinhos sem tampas. Ao final, os cadinhos foram tampados e mantidos em dessecador até a temperatura ambiente e pesados. Logo em seguida, as amostras foram submetidas ao teste de voláteis, em temperatura de 950°C (ASTM D3175). Os cadinhos



com tampa foram inseridos na mufla quando a temperatura já havia sido atingida e mantidos por cerca de 7 minutos. Em seguida, foram retirados, mantidos em dessecador até a temperatura ambiente e pesados. Ao final foi realizado o teste de cinzas (ASTM D3174 – 12). O teste também foi realizado no mesmo forno mufla, porém a temperatura de processo foi de 750°C e os cadinhos sem tampa foram colocados na mufla ainda fria, possibilitando que as amostras fossem submetidas a uma rampa de aquecimento até a temperatura final. Esse processo teve duração de 4 horas. O comportamento térmico das amostras, foi avaliado por análise termogravimétrica, utilizando o equipamento TGA Q50 da TA Instruments. Na análise termogravimétrica a amostra é submetida a um aquecimento progressivo sob uma atmosfera específica e a perda de massa é determinada. A atmosfera escolhida para este teste foi uma atmosfera inerte (N₂) com uma taxa de aquecimento de 10°C/min até a temperatura de 1000 °C. As curvas TG de todas as amostras de carvão foram determinadas e, para fins de comparação, também foi analisada uma amostra de carvão ativado. Buscando analisar a estrutura química dos grupos químicos remanescentes nas amostras de carvão foi realizada a espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) no equipamento da marca Nicolet, usando-se acessório de célula de diamante por ATR. Diversos grupos funcionais presentes foram observados a partir dos espectros, em que cada banda em um determinado número de onda indica a presença de um grupo químico no material. Também foi utilizada uma amostra de carvão ativado para fins de comparação.

Tabela 1: Condições dos experimentos de pirólise em leito fixo de resíduos sólidos urbanos

Ensaio	Biomassa	Meio	Tempo de Residência (min)
1	RSU	Com fluxo de N ₂	30
2	RSU + Madeira	Com fluxo de N ₂	30
3	RSU	Sem fluxo de N ₂	30
4	RSU + Madeira	Sem fluxo de N ₂	30
5	RSU	Com fluxo de N ₂	180
6	RSU + Madeira	Com fluxo de N ₂	180
7	RSU	Sem fluxo de N ₂	180
8	RSU + Madeira	Sem fluxo de N ₂	180

RSU = Resíduos sólidos urbanos (papel, tecido, plástico, plástico metalizado, borracha e couro)

RESULTADOS

O resíduo sólido urbano utilizado neste trabalho é formado por materiais provenientes da coleta seletiva de lixo, segregados no galpão da Associação de Catadores e que seriam encaminhados ao aterro sanitário. Estes resíduos são principalmente constituídos por plásticos e papéis recicláveis contendo pequena quantidade de matéria orgânica ou, ainda, por materiais sem valor de mercado para a reciclagem. A análise da composição dos resíduos foi realizada para uma amostra representativa do todo, contendo 3,97 kg. Inicialmente, os diferentes materiais foram separados, como mostrado na Figura 2.

Após a separação dos materiais, cada fração foi pesada e os resultados são apresentados na Tabela 2. A massa de materiais não pirolisáveis (vidro, cerâmica e metais) não foi incluída no cálculo do percentual de composição do RSU utilizado nos experimentos. O plástico foi o principal componente encontrado no RSU coletado, correspondendo a 61,3%, quando incluídos os plásticos metalizados.

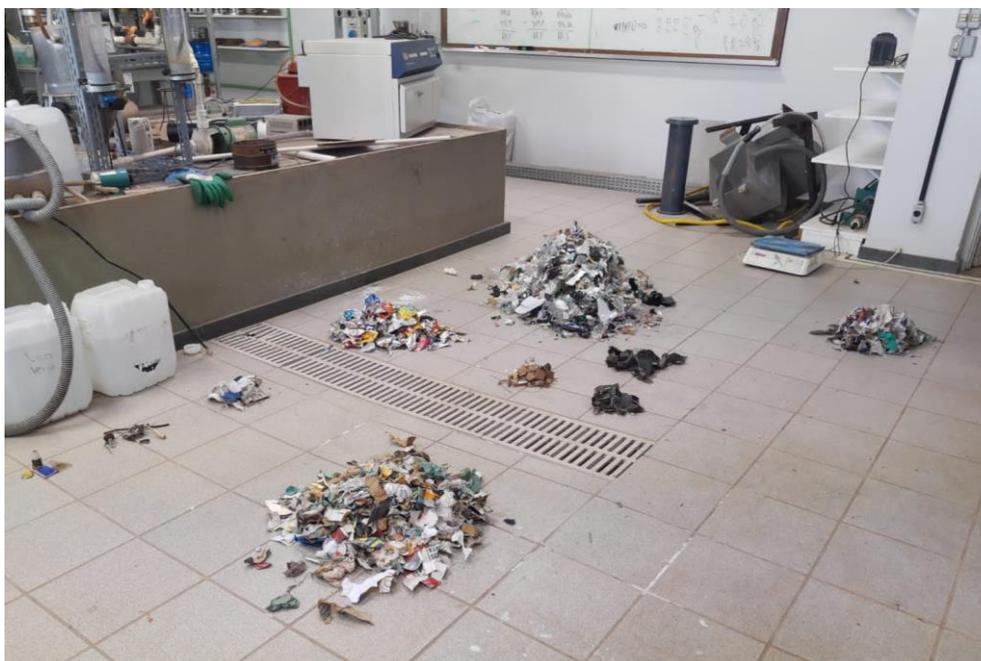


Figura 2: Frações da amostra de resíduos sólidos urbanos coletada na Associação de Catadores (Camar).

Tabela 2: Composição gravimétrica da amostra de resíduos sólidos coletada na Associação de Catadores (RSU coletado) e composição da amostra submetida a pirólise (RSU pirolisável)

Material	RSU coletados		RSU pirolisável*	
	Massa (g)	Composição (% m/m)	Massa (g)	Composição (% m/m)
Plástico (exceto os metalizados)	2210	55,7	2210	57,8
Papel	630	15,9	630	16,5
Borracha e couro	360	9,1	360	9,4
Tecido	330	8,3	330	8,6
Plástico metalizado	135	3,4	135	3,5
Madeira (compensado e MDF)	135	3,4	135	3,5
Máscaras e testes COVID-19	25	0,6	25	0,7
Vidros, cerâmicas e metais	145	3,6	-	-
Total	3970	100	3825	100

* Excluindo vidros, cerâmicas e metais

Para a realização das pirólises foi utilizado um reator de leito fixo, por proporcionar uma pirólise lenta e, conseqüentemente, maior rendimento de biocarvão, foco deste estudo. Além disso, este tipo de reator requer menor investimento em equipamentos e na operação, por ser mais simples quando comparado a um sistema com fluxo contínuo. Os rendimentos obtidos para as diferentes condições de pirólise são apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3: Rendimentos das pirólises realizadas em leito fixo, sob diferentes condições de operação**

Ensaio	Biomassa	Meio	Tempo de Residência (min)	Rendimentos (% m/m)			Taxa de Aquecimento (°C/min)
				Líquido	Sólido	Gás	
1	RSU	Com fluxo de N ₂	30	20,26	26,14	51,63	Não medida
2	RSU + madeira	Com fluxo de N ₂	30	33,33	28,67	38,00	31,67
3	RSU	Sem fluxo de N ₂	30	30,29	37,71	32,00	30,06
4	RSU + madeira	Sem fluxo de N ₂	30	34,23	30,87	34,90	33,93
5	RSU	Com fluxo de N ₂	180	34,85	25,00	40,15	29,69
6	RSU + madeira	Com fluxo de N ₂	180	32,00	17,33	50,67	31,67
7	RSU	Sem fluxo de N ₂	180	28,57	26,89	44,54	27,94
8	RSU + madeira	Sem fluxo de N ₂	180	34,87	28,29	36,84	29,69

Considerando os parâmetros variados nos experimentos de pirólise, em relação às matérias primas, optou-se por estudar a pirólise com e sem a presença da madeira. A madeira é um resíduo que chega de maneira esporádica à Associação Camar, enquanto os demais chegam diariamente. Porém, a madeira recolhida não tem destinação alguma e acumula-se no pátio do galpão, sendo importante avaliar sua inclusão no processo de pirólise. Já em relação ao meio no qual ocorre a pirólise, foram testadas duas condições: a primeira com o gás nitrogênio como gás de arraste, gás utilizado de maneira padrão em processos de pirólise. A desvantagem no uso do nitrogênio está associada ao seu custo de implantação, cuja viabilidade econômica na Associação de Catadores em Mariana deve ser avaliada em etapa posterior. A segunda condição testada foi a pirólise com o reator totalmente cheio de resíduo, de modo que a proporção de oxigênio seja muito baixa e seja logo consumida no início do processo. Assim o processo torna-se mais barato e factível para a Associação Camar. Desse modo verificou-se a necessidade do uso de nitrogênio para manter o processo de pirólise. Por fim, foram avaliados os tempos de residência de 30 e 180 minutos após estabilização da temperatura. No geral, pirólises com alto tempo de residência dos produtos voláteis favorecem a produção de carvão, enquanto um baixo tempo de residência favorece a formação de bio-óleo.

Analisando os resultados, observou-se que um menor tempo de residência permitiu um maior rendimento de bio-carvão, com uma média de 30,85% para 30 minutos de tempo de residência, e uma média de 24,38% para 180 minutos. Por outro lado, para os produtos líquidos e gasosos não se observou alteração significativa do rendimento quando se aumentou o tempo de residência. Este comportamento não seguiu a tendência esperada, mas mudanças são justificáveis considerando-se a diversidade das matérias primas utilizadas. Em relação ao meio de pirólise, observou-se que a pirólise com reator cheio proporcionou maior rendimento de carvão em relação à pirólise com gás nitrogênio, com rendimentos médios de 30,94% e 24,29%, respectivamente. A ausência de fluxo de nitrogênio pode ter aumentado o tempo de residência dos produtos voláteis no meio reacional, favorecendo a produção de bio-carvão. Tal resultado, embora extremamente positivo, deve ser melhor analisado levando em consideração principalmente as propriedades do carvão obtido. Por fim, em relação à matéria-prima, não houve grandes diferenças de rendimento do carvão, sendo que, com apenas RSU, houve 28,94% de rendimento e com a presença de madeira esse rendimento caiu para 26,29%.

De maneira geral, foi obtida uma maior quantidade de gases com uma média de 41,09%. No entanto, é válido ressaltar que parte desses gases podem ser vapores condensáveis que foram perdidos por ineficiências do processo. O líquido representou, em média, 31,05% e o sólido 27,61% em média.

Para a caracterização dos carvões gerados foram realizados ensaios gravimétricos (umidade, voláteis e cinzas), análise termogravimétrica e espectroscopia na região do infravermelho médio por transformada de Fourier (FTIR). As técnicas



escolhidas foram importantes para se avaliar o teor de carbono fixo do material, além de sua estabilidade térmica e suas características químicas principais.

Os resultados dos testes gravimétricos dos carvões obtidos nas pirólises são apresentados na Tabela 4. Observou-se que os valores de umidade e voláteis foram superiores quando comparados com valores referência. Isso se deve possivelmente à presença de madeira e demais possíveis materiais orgânicos presentes nas amostras. Porém, o baixo teor de cinzas e alta porcentagem de carbono fixo indicaram resultados satisfatórios em relação a qualidade do carvão obtido, pois quanto maior a porcentagem de carbono fixo, melhor sua qualidade e mais alto seu potencial de aplicação (CHEN et al., 2014).

Tabela 4: Resultados das análises gravimétricas dos carvões

Amostra	Umidade % m/m	Voláteis % m/m	Cinzas % m/m	Carbono fixo % m/m
1	4,76	43,77	27,94	23,52
2	7,51	43,79	14,68	34,01
3	4,87	41,72	27,49	25,92
4	7,50	46,77	17,91	27,81
5	4,31	43,59	25,07	27,03
6	7,78	42,65	21,84	27,72
7	6,82	40,20	30,83	22,14
8	7,53	39,67	18,83	33,97
Referência *	0,74 a 3,35	19,85 a 33,14	52,33 a 72,45	6,96 a 11,18

*(LI et al., 2018)

Os resultados de análise termogravimétrica realizadas com os carvões obtidos na pirólise e o carvão ativado comercial, usado como referência, são apresentados na Figura 3.

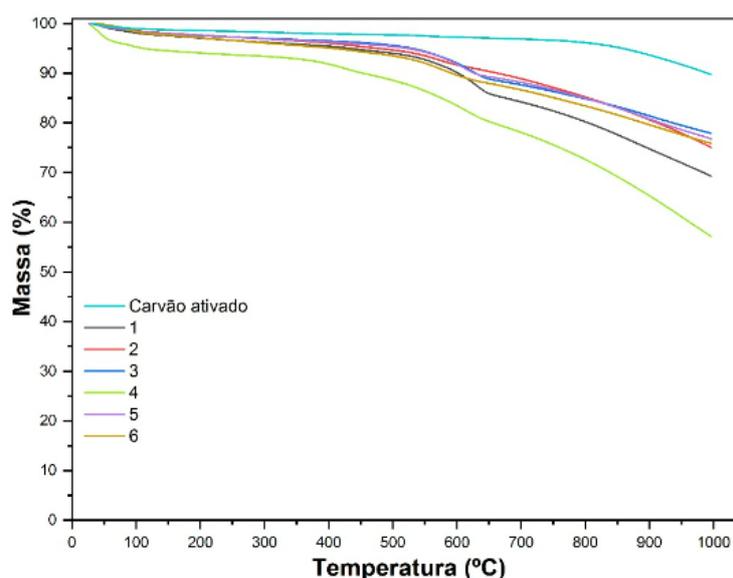


Figura 3: Curvas TG das amostras de carvão e amostra de referência (carvão ativado).

Fonte: Autor, 2022



Pode-se observar que todas as amostras apresentaram estabilidade térmica semelhantes. Além disso, observou-se também que os carvões obtidos na pirólise possuem menor estabilidade térmica, apresentando um evento de degradação térmica em 650 °C, o que não ocorre no carvão ativado. Este é um comportamento esperado, já que as amostras obtidas pós pirólise não passaram por nenhum tipo de ativação prévia e foram analisadas como recebidas. Porém, o fato de as amostras apresentarem resultados semelhantes entre si indica que as variáveis de processo não provocaram mudanças significativas na estabilidade térmica dos carvões.

Quanto à estrutura química, a Figura 4 mostra os espectros de FTIR obtidos para as amostras de biocarvão. Comparando-se os espectros dos carvões obtidos na pirólise e o carvão ativado, é possível observar a presença de bandas referentes a hidroxilas (banda larga a 3400 – 3500 cm^{-1}), ligações C=C (1600 – 1450 cm^{-1}) e ligações C-O (1205 – 1125 cm^{-1}). A presença destes grupos mostra material remanescente não degradado nos carvões da pirólise.

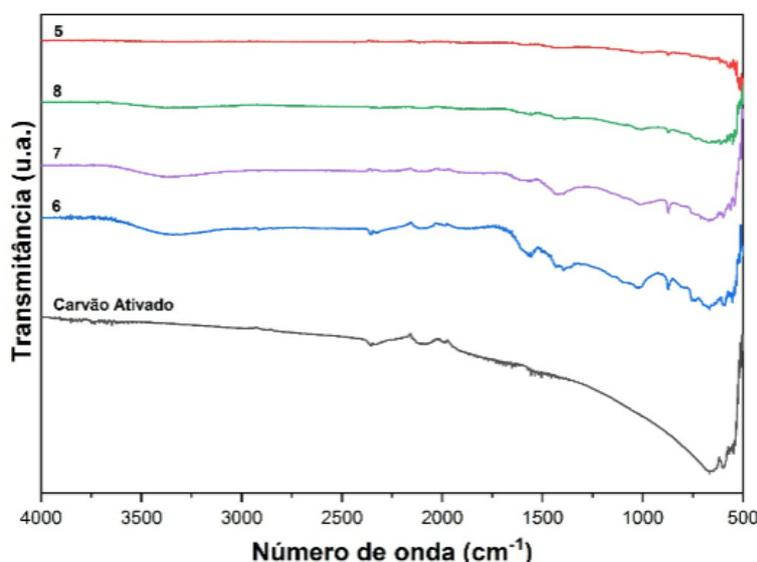


Figura 4: Espectros de FTIR alguns carvões obtidos na pirólise e do carvão ativado
Fonte: Autor, 2022

CONCLUSÕES:

Os resíduos sólidos segregados em uma associação de catadores, que não são comercializados por não terem valor comercial ou estarem contaminados com resíduos orgânicos, foram coletados, cominuídos e caracterizados quanto à composição gravimétrica. Com essa amostra foram realizadas pirólises em leito fixo variando-se os parâmetros atmosfera de reação, tempo de residência e composição. Os produtos sólidos (carvões) obtidos nas pirólises foram caracterizados e observou-se que, entre os carvões analisados, não houve diferenças significativas quanto às suas características químicas e físicas. Nos espectros de infravermelho observaram-se bandas referentes à presença de grupos químicos remanescentes, mostrando a degradação incompleta do material, o que foi corroborado pelas análises termogravimétricas dos carvões com um evento de degradação térmica a 650°C. A menor estabilidade térmica dos biocarvões frente ao carvão ativado comercial pode ser modificada realizando-se um processo de ativação, indicando uma aplicação potencial para o produto obtido. Diante do objetivo principal de produção de biocarvão para agregar valor econômico aos produtos da associação de catadores, conclui-se que as melhores variáveis de processo para a pirólise foram o meio sem fluxo de nitrogênio e o tempo de residência de 30 minutos, condições em que se obteve o carvão com maior rendimento do processo e que demandam menor custo operacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

Alandin, A., Modding, B. Dewi, F., C. Effect of nitrogen gas flowing continuously into the pyrolysis reactor for simultaneous production of charcoal and liquid smoke. Journal of Physics: Conference Series, 2020. Acesso em: 13 de abril de 2022.



Amenaghawon, A.N., Anyalewechi, C.L., Okieimen, C.O. et al. **Biomass pyrolysis technologies for value-added products: a state-of-the-art review.** Environ Dev Sustain 2021. Acesso em: 13 de abril de 2022.

CHEN, Dezhen; YIN, Lijie; WANG, Huan; HE, Pinjing. Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. Elsevier, [s. l.], 2014.

Hu Z, Zhou T, Tian H, et al. **Effects of pyrolysis parameters on the distribution of pyrolysis products of Miscanthus.** Progress in Reaction Kinetics and Mechanism. Janeiro 2021. Acesso em: 13 de abril de 2022

JAHIRUL, M. I. et al. **Biofuels Production through Biomass Pyrolysis : A Technological Review** . Energies, Austrália, v. 5, n. 12, p. 4952-5001, nov./2012. Disponível em:
<https://www.mdpi.com/1996-1073/5/12/4952>. Acesso em: 20 ago. 2021.

Ławinska, O.; Korombel, A.; Zajemska, M. **Pyrolysis-Based Municipal Solid Waste Management in Poland—SWOT Analysis.** Energies 2022. Acesso em: 13 de abril de 2022

LI, Simeng; BARRETO, Vanessa; LI, Runwei; CHEN, Gang; HSIEH, Yuch P. Nitrogen retention of biochar derived from different feedstocks at variable pyrolysis temperatures. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [S. l.], v. 133, n. April, p. 136–146, 2018. ISSN: 01652370. DOI: 10.1016/j.jaap.2018.04.010.

RAMOS, M, M, L, C. **Levantamento de modelo adequado de parceria entre município(s) com instituição privada para viabilizar a implantação de unidades autossustentáveis de tratamento de resíduos sólidos urbanos por pirólise.**