

# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

## PREPARAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DA PIRÓLISE DE VAGENS DE FLAMBOYANT (*Delonix regia*)

\*Marcelo Mendes Pedroza<sup>1</sup>  
Alexandre Cotrin da Silva<sup>2</sup>  
Pedro Alexandre Pinto Cerqueira Barros<sup>1</sup>  
Cláudia da Silva Aguiar Rezende<sup>1</sup>  
Ranyere do Nascimento Lôbo<sup>1</sup>  
Matheus Gomes Arruda<sup>1</sup>

## PREPARATION OF ACTIVATED CARBON FROM PYROLYSIS OF FLAMBOYANT PODS (*Delonix regia*)

Recibido el 21 de agosto de 2022. Aceptado el 25 de enero de 2023

### Abstract

In recent years a growing problem that has been gaining space is the issue involved with the waste produced by human activities. The amount of solid waste produced and collected daily has taken on worrying proportions, since if not properly disposed of, this waste can cause damage to the environment, and to human beings themselves, being necessary to search for new technologies for the reuse of solid waste. The flamboyant (*Delonix regia*), is an ornamental species widely used for landscaping purposes, due to its beauty. The pruning residues of the flamboyant can be expressive, due to their quantity in several places. This work aimed to use the flamboyant pruning residue in the pyrolysis process for the production of activated carbon. The biomass was characterized through immediate analysis: volatile material (84.56%), ash (3.84%) and fixed carbon (11.57%). The pyrolysis experiments of the residue were carried out in a fixed bed reactor, at two different temperatures (350°C and 550°C) during 30 minutes of thermal degradation, in which an initial residue mass yield of 25.99% was obtained for the pyrolysis at 550° and 35.49% for pyrolysis at 350°C. After the pyrolysis tests, the charcoal samples obtained during the process were collected, stored and characterized by the same analytical techniques used with in Nature biomass, in addition to the methylene blue adsorption test on an orbital shaker table in which multivariable planning was used the delineation of centered faces with 7 types of combinations of mass and dye concentration, where all results had more than 80% efficiency, being the highest of them 85.93%.

**Keywords:** flamboyant, activated carbon, pyrolysis, pruning residue, solid waste.

<sup>1</sup> Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN) no Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia do Tocantins (IFTO), Palmas – Tocantins, Brasil.

<sup>2</sup> Laboratório de Energia Renovável da Universidade Federal do Tocantins (UFT), Palmas – Tocantins, Brasil.

\* *Autor correspondente:* Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN) no Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia do Tocantins (IFTO), Palmas – Tocantins, Brasil. 310 Sul, Av. LO 5, s/n - Plano Diretor Sul, Palmas – TO. CEP: 77021-090.. Email: [mendes@ifto.edu.br](mailto:mendes@ifto.edu.br)

## Resumo

Nos últimos anos uma crescente problemática que vem ganhando espaço é a questão envolvida com os resíduos produzidos pelas atividades humanas. A quantidade de resíduos sólidos produzidos e coletados diariamente tem tomado proporções preocupantes, visto que se não forem corretamente destinados, esses resíduos podem causar danos ao meio ambiente, e aos próprios seres humanos, sendo necessária a busca por novas tecnologias para reutilização de resíduos sólidos. O flamboyant (*Delonix regia*), é uma espécie ornamental muito utilizada para fins de paisagismo, devido a sua beleza. Os resíduos de poda do flamboyant podem ser expressivos, devido a sua quantidade em diversos locais. Este trabalho teve como objetivo utilizar o resíduo da poda de flamboyant no processo de pirólise para a produção de carvão ativado. A biomassa foi caracterizada através das análises imediatas: material volátil (84.56%), cinzas (3.84%) e carbono fixo (11.57%). Os experimentos de pirólise do resíduo foram realizados em reator de leito fixo, em duas temperaturas diferentes (350 e 550 °C) durante 30 minutos de degradação térmica na qual foram obtidas um rendimento da massa inicial do resíduo de 25.99% para a pirólise a 550 °C e de 35.49% para a pirólise a 350°C. Após os ensaios de pirólise, as amostras de carvão obtidas durante o processo foram coletadas, armazenadas e caracterizadas pelas mesmas técnicas analíticas empregadas com a biomassa in natura além do teste de adsorção de azul de metileno em mesa agitadora orbital no qual foi utilizado o planejamento multivariável do delineamento de faces centradas com 7 tipos de combinações de massa e concentração de corante, onde todos os resultados tiveram mais de 80% de eficiência, sendo o maior deles de 85.93%.

**Palavras-chave:** flamboyant, resíduos de poda, resíduos sólidos, carvão ativado, pirólise.

---

## Introdução

Segundo o Ministério do Meio Ambiente, o Brasil abriga a maior biodiversidade do mundo, contendo cerca de 20% do número total de espécies do planeta. Além de ter tamanha diversidade, durante o período colonial, foram trazidas para o Brasil diversas outras espécies que não eram nativas dessa região como a cana de açúcar da Nova Guiné, o café da Etiópia, arroz das Filipinas, eucaliptos da Austrália, bovinos da Índia, carpas da China dentre outras espécies que, facilmente se adaptaram devido ao clima e solo do país (Nabais *et al.*, 2008).

O Flamboyant (*Delonix regia*), é uma árvore ornamental com origem na ilha de Madagascar e que foi levada por todo o mundo devido sua beleza, com copas largas e flores vermelhas como fogo, o que a faz ser utilizada principalmente como elemento de paisagismo em parques, canteiros, bosques, dentre outros. Seu cultivo está presente em quase todo o território nacional, de norte a sul do país (Vargas *et al.*, 2011).

Uma preocupação que vem cada vez mais tomando espaço e ganhando representatividade é a respeito do destino correto a ser dado aos resíduos sólidos gerados pelas atividades humanas. De acordo com Paz *et al.* (2021), a falta de modelos para a gestão de resíduos da arborização urbana está contribuindo para agravar problemas ambientais, sociais e econômicos derivados da disposição inadequada desses materiais.

De acordo com o plano estadual de resíduos sólidos do estado do Tocantins (Tocantins, 2017), na capital Palmas, são geradas cerca de 1337.40 toneladas de resíduos de limpeza urbana mensalmente. O que representa 37% do total de resíduos de limpeza urbana gerados em todo o estado. A secretaria de infraestrutura e serviços públicos (SEISP) tem um cronograma mensal de coleta de galhas em Palmas e os trabalhos atendem todas as regiões da capital. As equipes percorrem ruas internas das quadras e avenidas coletando galhas descartadas após a poda de árvores (Pedroza *et al.*, 2021).

No Brasil os resíduos de poda urbana são geralmente depositados em lixões ou aterros, contribuindo assim para a produção de metano e chorume e acelerando o preenchimento das valas e por consequência acelerando o esgotamento das áreas dos aterros. Os lixões podem poluir lençóis freáticos e aquíferos subterrâneos por meio da infiltração no solo. Em se tratando de madeira de poda, a deposição final em aterro sanitário consiste em um desperdício de matéria com potencial energético, esses resíduos podem ser aproveitados como matéria prima para a fabricação de produtos sólidos, geração de energia por meio da fabricação de carvão, entre outros. Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), o Brasil perde cerca de 14 bilhões de reais por ano com a falta de reciclagem de resíduos sólidos (Pedroza *et al.*, 2021).

Uma alternativa viável que vem sendo estudada em diversos segmentos é a utilização de biomassa para a produção de adsorventes de baixo custo ou biossorventes. De acordo com Pedroza *et al.* (2014), a biomassa é todo material de caráter orgânico no qual através de fotossíntese, pode armazenar energia radiante do sol dentre sua composição química, podendo ser convertida em outras formas de energia. Segundo Bridgwater (2012), são dois os principais tipos de tecnologias empregados na conversão de biomassa em energia, os processos termoquímicos e bioquímicos. A pirólise se trata de uma das principais tecnologias termoquímicas para essa conversão, na qual produtos como bio-óleo, carvão ativado e biogás são gerados.

Processos e métodos de tratamento como coagulação, floculação, biodegradação, separações de membrana, troca iônica, oxidação, processo de oxidação avançado e adsorção são usados para remover vários tipos de poluentes. Esses métodos têm algumas desvantagens, como elevada produção de lodo, processos lentos, capacidade limitada, grande consumo de energia, e podem requerer um ambiente favorável ideal.

Adsorção, usando principalmente carvão ativado, é um método simples e economicamente viável de remoção de poluentes. Algumas de suas vantagens em relação aos outros métodos convencionais de tratamento incluem, a necessidade de uma área menor, menor sensibilidade a variações diurnas, e um design melhor ou flexibilidade operacional (Paz *et al.*, 2021; Marin *et al.*, 2014; Wu *et al.*, 2005).

O carvão ativado se tornou um dos mais importantes e amplamente usados adsorventes devido a sua porosidade interna altamente desenvolvida e grande área superficial, permitindo assim sua alta capacidade de adsorção. A demanda de carvão ativado tem crescido em vários tipos de indústrias, como a farmacêutica por exemplo, fazendo assim com que a demanda por carvão ativado cresça cada vez mais (Pedroza *et al.*, 2014).

Este trabalho consiste em avaliar a aplicabilidade da espécie de poda de árvore, Flamboyant (*Delonix regia*), para a produção de carvão ativado através do processo de pirólise, visando a sua utilização industrial.

### Metodologia

A metodologia a ser usada nessa pesquisa é baseada no diagrama esquemático da Figura 1.

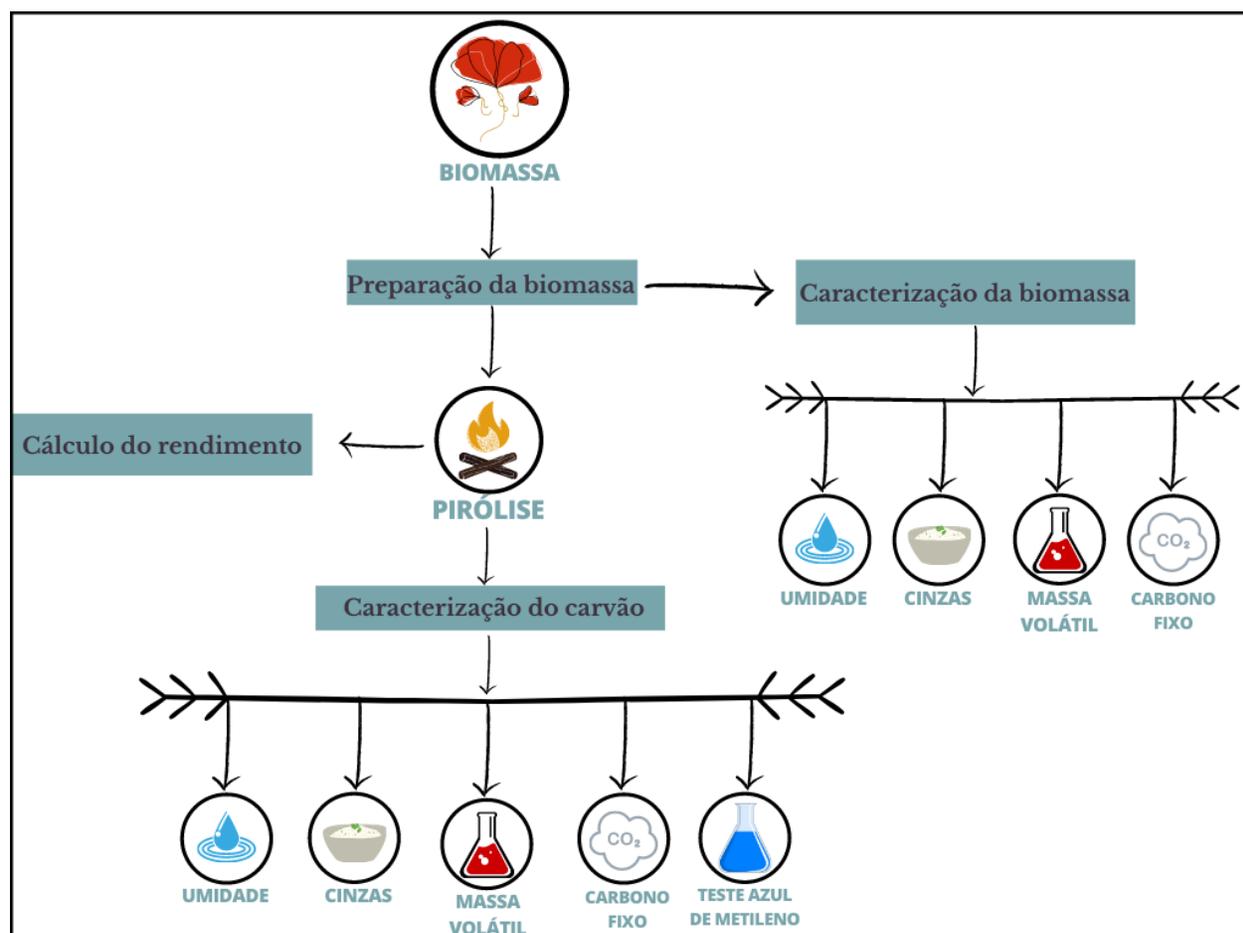


Figura 1. Diagrama dos procedimentos metodológicos abordados nesse trabalho.

### Coleta e preparo da amostra

Nessa pesquisa foi usada vagens de Flamboyant (com a retirada da semente). A amostra foi adquirida através de coleta em canteiros da cidade de Palmas-TO, na qual pode-se encontrar exemplares da espécie por diversas partes da cidade. As vagens (Figura 2) foram coletadas nas árvores e seus arredores, após a coleta as mesmas foram levadas para o laboratório de inovação em aproveitamento de resíduos e sustentabilidade energética (LARSEN) do Instituto federal do Tocantins (IFTO), campus Palmas, onde foi realizada a retirada das sementes de dentro das vagens.



**Figura 2.** Biomassa empregada nos ensaios de pirólise.

### Procedimentos analíticos empregados na caracterização do resíduo

A análise imediata (umidade, cinzas, material volátil e carbono fixo) do resíduo foi realizada no laboratório de inovação em aproveitamento de resíduos e sustentabilidade energética do Tocantins (LARSEN) – campus Palmas.

### Pirólise do resíduo

A biomassa foi inserida ao reator para cada procedimento de pirólise. A conversão térmica foi efetuada em um reator de leito fixo (Figura 3) de aço inox de 60 cm de comprimento e diâmetro externo de 5.0 cm. O reator foi aquecido por forno bipartido reclinável (marca FLYEVER, modelo FE50RPN e linha 05/50), sendo operado em regime de batelada. O gás inerte de arraste empregado na reação foi o vapor de água aquecido a 133 °C em autoclave com pressão de 2 kgf/cm<sup>2</sup>. Foram efetuados ensaios com duas temperaturas do reator (350 e 550 °C). A vazão de gás inerte foi de 6 mL/min e taxa de aquecimento igual a 20 °C/min. A duração da pirólise para cada experimento foi programada com tempo de 15 min iniciais em temperatura de 150 °C e 30 min para as temperaturas de pirólise. Para fins de balanço de massa, após a reação e o

resfriamento da unidade de pirólise, o material sólido foi recuperado diretamente do reator, pesado e armazenado. Não há relatos na literatura do uso de vapor de água aquecido em processo de pirólise de vagens de Flamboyant em escala de laboratório. Esse tipo de fluido empregado como gás de arraste de vapores do reator tem a finalidade de melhorar as características químicas do carvão obtido no processo, bem como diminuir os custos com o uso de gases inertes comumente empregados (nitrogênio, argônio, hélio).



**Figura 3.** Reator empregado nos ensaios de pirólise.

#### Procedimentos analíticos empregados na caracterização do carvão

O carvão obtido no processo foi caracterizado através da análise imediata (material volátil, cinzas e carbono fixo), com a utilização das mesmas metodologias empregadas durante a caracterização do resíduo *in natura*.

Foi realizado o teste de adsorção de azul de metileno com o carvão ativado obtido nessa pesquisa, sendo usada uma mesa agitadora orbital da marca TECNAL modelo TE-141 (Figura 4).



**Figura 4.** Testes de adsorção.

A análise dos resultados foi obtida com o auxílio do software *Protimiza Experimental Design* no qual foi utilizado o planejamento multivariável do delineamento de faces centradas (DFC) com o efeito de dois fatores, sendo o fator 1 a concentração de azul de metileno e o fator 2 a massa de carvão utilizado. Esse planejamento teve como finalidade observar como as duas variáveis influenciam na adsorção do azul de metileno observando as melhores dosagens aplicadas durante o processo. Não há relatórios anteriores sobre a otimização do processo de adsorção de corante em carvão ativado proveniente da pirólise de vagens de Flamboyant usando a metodologia de superfície de resposta.

Foi utilizado o planejamento experimental do tipo Delineamento de faces centradas (DFC), sem repetições e com 7 tipos de combinações entre os fatores, sem que houvesse perda da qualidade. Os ensaios foram efetuados de acordo com os fatores e níveis expostos na Tabela 1.

**Tabela 1.** Fatores e níveis utilizados no planejamento experimental.

Fatores	Níveis		
	(-1)	0	(+1)
Concentração de azul de metileno	20 mg/L	60 mg/L	100 mg/L
Massa de carvão	0.5 g	0.75 g	1.0 g

Em seguida foi elaborada a ordem dos experimentos que foram adotados nesta pesquisa, como mostra a Tabela 2.

**Tabela 2.** Ordem dos experimentos.

Ordem dos experimentos	Fatores	
	Concentração (mg/L)	Massa de carvão (g)
1	20	0.50
2	20	1.00
3	100	0.50
4	100	1.00
5	60	0.75
6	60	0.75
7	60	0.75

Determinados então os ensaios que precisavam ser feitos, foram separados em 7 erlenmeyers diferentes cada uma das soluções, contendo a massa de carvão e o azul de metileno com determinada concentração. Após 30 minutos na mesa agitadora as amostras foram retiradas, filtradas para separar do carvão do líquido. Para medição da absorbância da solução efluente, empregou-se um espectrofotômetro de duplo feixe da marca PERKIN ELMER, modelo LAMBDA 750, em 650 nm. Além disso, foi realizada uma curva de calibração para analisar as soluções com concentrações iguais a: 1, 2, 3, 5, 7 e 10 mg/L. As soluções de concentração menor foram obtidas a partir da diluição da solução inicial de azul de metileno a 100 mg/L.

### Resultados e discussão

Essa etapa do trabalho relata os resultados que foram obtidos nos ensaios executados para a caracterização da biomassa e do carvão ativado, de acordo com a metodologia descrita anteriormente. Os ensaios de caracterização da biomassa são o ensaio de umidade, de teor de cinzas, massa volátil e de carbono fixo. Para a caracterização do carvão ativado foram utilizados os mesmos ensaios de caracterização da biomassa, além do teste de adsorção do corante azul de metileno.

#### Caracterização da biomassa

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios realizados para a caracterização da biomassa do resíduo de poda de flamboyant em um comparativo de resultados de outros trabalhos que executaram esses mesmos ensaios com outros tipos de biomassas, mais especificamente, diferentes tipos de madeira. A amostra de biomassa analisada nesta etapa da pesquisa apresentou níveis baixos de umidade, sendo em alguns ensaios a característica anidra do material. A amostra empregada nesta pesquisa passou por secagem em estufa a 60 °C por 24 horas antes das etapas de caracterização e ensaios de pirólise.

**Tabela 3.** Resultado da análise imediata da biomassa.

Ensaio	Resultados (%)	Resultados comparativos (%)		
		Maia (2020) Casca de castanha de caju	Silva (2021) Castanha do Brasil	Rodrigues (2018) Casca de arroz
Umidade (%)	-	6.10	5.06	6.95
Material Volátil (%)	84.56	75.1	69.21	83.32
Teor de cinzas (%)	3.87	2.00	1.5	9.54
Carbono fixo (%)	11.57	16.80	24.12	1.19

Pode-se dividir a degradação térmica de biomassa em duas etapas, a secagem, etapa onde o material perde a água contida nele, e a devolatilização, que pode ser descrita como a liberação de uma vasta gama de espécies voláteis que emergem em diferentes taxas. A etapa de secagem se apresenta em uma faixa de temperatura que vai até os 150°C, enquanto o estágio de devolatilização se encontra geralmente em um intervalo de 150 a 700°C (Silva, 2021).

Quanto maior o teor de material volátil, maior é a reatividade da ignição, dessa forma o teor de material volátil determina a facilidade com que uma biomassa queima (Maia, 2020; Mullen *et al.*, 2010). Comparando com os valores de material volátil de outras pesquisas, é possível notar que o resultado obtido nos ensaios com o resíduo de poda (84.56%) é um bom valor, sendo um material adequado para o processo de pirólise.

As cinzas são compostas por materiais não orgânicos e geralmente são indesejadas nos processos industriais pois podem diminuir o poder calorífico ocasionando perdas energéticas (Andrade, 2015; Danish *et al.*, 2015). Quando possuem altos teores de cinzas os carvões podem gerar problemas de incrustações, entupimentos e até mesmo corrosão em processos de combustão e pirólise, tendo como resultado um aumento do custo operacional (Silva, 2016; Chen *et al.*, 2014). O baixo teor de cinzas do material estudado (3.87%) demonstra que é um material com um bom potencial para utilização na pirólise e fabricação do carvão ativado.

Um elevado teor de material volátil está diretamente relacionado à facilidade de uma biomassa entrar em combustão em baixas temperaturas, e com estabilidade de chama, sendo que o teor de carbono fixo está diretamente ligado ao material volátil (Meira, 2010; Biswas *et al.*, 2017). O carbono fixo representa a massa restante após a liberação dos compostos voláteis presentes na biomassa, excluindo as cinzas e teores de umidade (Bridgwater, 2012).

O processo de carbonização pode então ser resumido em concentrar carbono e expulsar o oxigênio, obtendo como resultado o aumento do conteúdo energético do produto (Froehlich *et al.*, 2014).

O resultado do carbono fixo para a biomassa de resíduo de poda foi de 11.57%, menor que a maioria dos resultados que foram usados como comparativo. O baixo teor de carbono fixo na biomassa junto com o alto teor de material volátil, significa que esse material tem uma combustão rápida, favorecendo assim o processo de pirólise.

#### Rendimento de carvão obtido durante a pirólise de biomassa

Os resultados obtidos nos experimentos iniciais de pirólise da biomassa para produção de carvão estão apresentados na Tabela 4. Os dados da pirólise foram processados aplicando o teste- t presumindo variâncias equivalentes no tratamento estudado para que fosse possível verificar se havia diferença entre eles, conforme na Tabela 5.

**Tabela 4.** Dados de rendimento do carvão obtidos durante o ensaio de pirólise.

Experimentos	Temperaturas	
	550°C	350°C
1	25.86	31.65
2	25.52	38.95
3	26.59	35.86
Desvio padrão	0.44	2.99
Grau de liberdade	4	4

**Tabela 5.** Análise estatística obtida com o teste-t considerando variância equivalentes para a produção de carvão nos ensaios de pirólise.

Termos estatísticos	Temperatura (°C)	
	550°C	350°C
Média	25.99	35.49
Variância	0.296857702	13.43776385
Observações	3	3
Variância agrupada	6.86731	
Hipótese da diferença de média	0	
Gl	4	
Stat t	-4.439387969	
P(T<=t) uni-caudal	0.00566966	
t crítico uni-caudal	2.131846786	
P(T<=t) bi-caudal	0.01133932	
t crítico bi-caudal	2.776445105	

Fonte: Autor (2021)

De acordo com os dados obtidos nos ensaios e nas análises, como pode ser observado nas Tabelas 4 e 5, existe uma diferença com o nível de confiança de 95% entre as médias de rendimento das duas temperaturas diferentes adotadas (550°C e 350°C). Visto isso, partindo como referência apenas o rendimento do carvão, sem levar em conta suas características químicas, o recomendado seria em se optar pela produção com o reator a temperatura de 350°C, visto que a mesma gera um rendimento maior e tem um gasto energético bem inferior comparado ao processo executado na temperatura de 550°C.

Segundo Pedroza et al (2021), o máximo rendimento de carvão é obtido quando a taxa de aquecimento e a temperatura são baixas, sendo que a devolatilização dos compostos orgânicos sólidos, pode ser o fator que causa a redução no rendimento da fração sólida com o aumento da temperatura. A temperatura final da pirólise desempenha um papel muito importante nas diversas reações químicas envolvidas no processo e também influencia nas características químicas e físicas dos produtos gerados. Para a maioria das biomassas, o aumento da temperatura e do tempo de reação reduz a produção final de bio-óleo e carvão ativado, favorecendo a formação de gases (Siebeneichler *et al.*, 2017; Hossain *et al.*, 2009; Veloso *et al.*, 2022).

Na Tabela 6 estão os resultados obtidos com a pirólise para produção do carvão ativado em reator de leito fixo, além de mostrar resultados de outros trabalhos para um comparativo. Pode se observar que os resultados obtidos na pesquisa com o resíduo de poda estão dentro dos intervalos obtidos em outras pesquisas.

**Tabela 6.** Comparativo entre os resultados de rendimento do carvão.

Rendimento (%)		Vargas <i>et al.</i> (2011)	Silva (2021)	Nabais <i>et al.</i> (2008)
550°C	350°C	Serragem de Angelim	Castanha do Brasil	Resíduo de indústria de madeira
		Pedra (%)	(%)	(%)
25.99	35.49	22.27 a 29.71	37.65 a 54.08	43.60

Saber o rendimento do material é fundamental, principalmente quando se trata de comercializar o mesmo, pois através do rendimento é possível que se possa calcular quanto da matéria prima seria necessária para produzir uma certa quantidade do carvão ativado. Por exemplo, para que se possa produzir 100Kg de carvão ativado oriundo da pirólise do resíduo estudado nessa pesquisa, seriam necessários aproximadamente 282Kg de biomassa, visto que o rendimento é de 35.49. Com base nos dados levantados por Machado (2019), no qual relata que o custo do carvão

ativado é de R\$ 3.89/Kg, e considerando a situação discutida por ele na qual a empresa BRK ambiental, no ano de 2018, utilizou 10.575Kg de carvão ativado no tratamento de água da ETA 006 em 4 meses, resultando num custo total de R\$ 41.136 podemos levar em consideração que uma grande parte desse valor poderia ser poupado caso houvesse a produção de carvão ativado a partir de biomassa, a qual poderia ser obtida com parcerias com os órgãos que fazem os serviços de poda (como companhias elétricas por exemplo).

#### Teste de adsorção de azul de metileno em carvão ativado

Nessa etapa foi realizado o ensaio de adsorção do corante azul de metileno. Para o ensaio foi utilizado o carvão ativado obtido no processo de pirólise da vagem de flamboyant. A partir do ensaio avaliou-se a capacidade de adsorção do carvão e a eficiência de remoção do corante. O modelo escolhido para os ensaios de adsorção foi o Delineamento Experimental de Faces Centradas - DFC. A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos no planejamento experimental, sendo a massa de carvão (X1) e a concentração de corante (X2) as variáveis independentes do processo.

**Tabela 7.** Resultado do teste de adsorção realizado.

Experimento	Massa do carvão (g)	Concentração do corante (mg/L)	Absorbância do filtrado	Eficiência de remoção (%)	Capacidade de adsorção
1	0.5	20	0.62	80.81	0.98
2	1	20	0.45	85.93	0.51
3	0.5	100	2.87	82.51	4.95
4	1	100	2,95	82.03	2.46
5	0.75	60	1.83	81.31	1.95
6	0.75	60	1.70	82.69	1.98
7	0.75	60	1.64	83.3	1.99

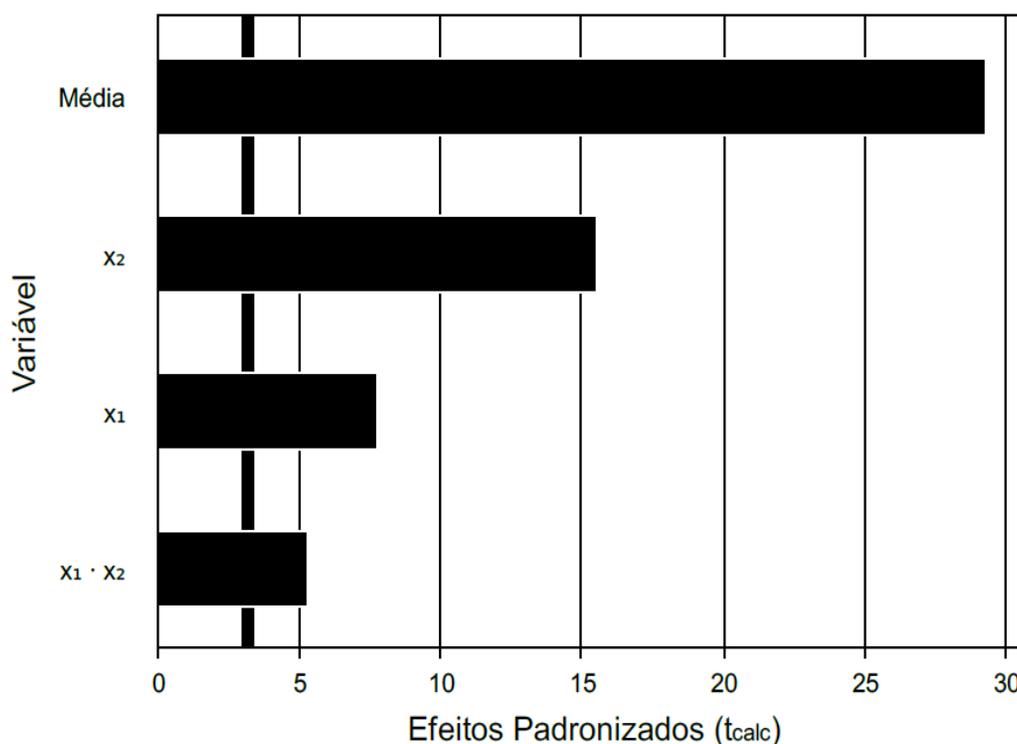
A capacidade máxima de adsorção de um carvão diz respeito ao poder de adsorção que um carvão tem em determinadas condições de trabalho, ou seja, refere-se a eficiência do carvão ativado no ensaio realizado. Os dados referentes à obtenção do modelo matemático que relaciona a interação dos fatores X1 e X2 com a variável de resposta (capacidade de adsorção), são dispostos na Tabela 8.

A partir da análise do Diagrama de Pareto (Figura 5), observa-se que ambos os fatores envolvidos no teste de adsorção (X1 e X2) influenciaram de maneira significativa na capacidade máxima de adsorção do carvão em estudo.

**Tabela 8.** Coeficientes de regressão do planejamento DFC para obtenção do modelo matemático que relaciona X1 e X2 com a capacidade de adsorção do carvão de vagem de flamboyant.

Fatores	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t-calculado	p-valor
Média	2.12	0.07	29.33	0.0001
X1	-0.74	0.10	-7.75	0.0045
X2	1.48	0.10	15.50	0.0006
X1.X2	-0.51	0.10	-5.29	0.0132

Fonte: Autor (2021)



**Figura 5.** Diagrama de Pareto da capacidade máxima de adsorção (Q) do carvão.

Com os coeficientes da análise de regressão foi possível construir o modelo estatístico que representa a capacidade de adsorção do carvão ativado produzido através da pirólise de vagens de Flamboyant, conforme Equação 1.

$$Q = 2.12 - 0.74X1 + 1.48X2 - 0.51X1.X2$$

**Equação (1)**

X1 = massa de carvão

X2 = Concentração de azul de metileno

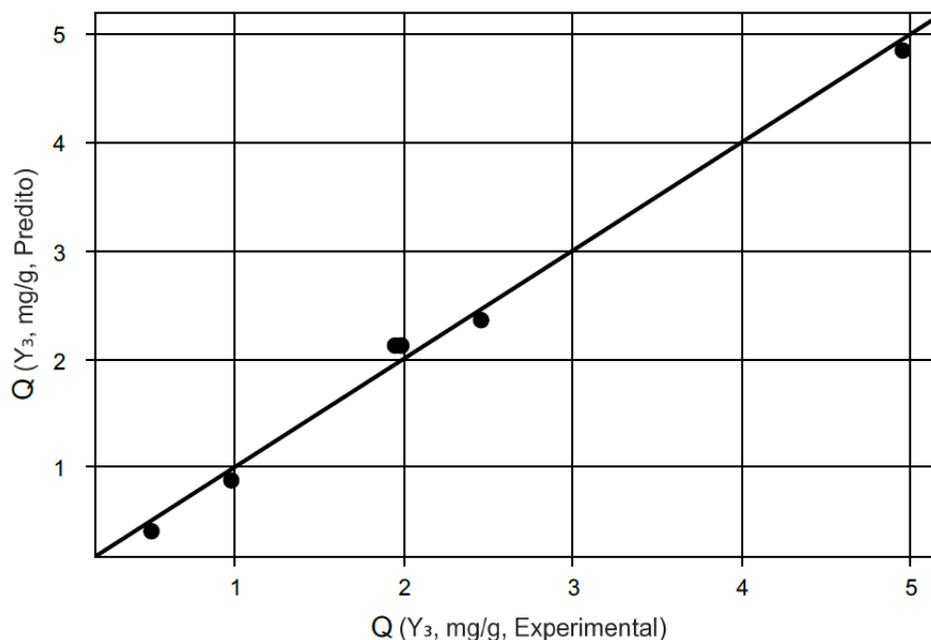
Na Tabela 9 está demonstrada a análise de variância (ANOVA) da capacidade máxima de adsorção (Q) das amostras de carvão ativado de resíduo de poda de flamboyant.

**Tabela 9.** ANOVA para capacidade máxima de adsorção da absorvância das amostras de carvão ativado na adsorção de azul de metileno.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	P valor
Regressão	12	3	4.0	109.4	0.001
Resíduos	0.1	3	0.0		
Falta de ajuste	0.1	1	0.1	250.6	0.003
Erro Puro	0.0	2	0.0		
Total	12.1	6			

$R^2 = 99.09\%$

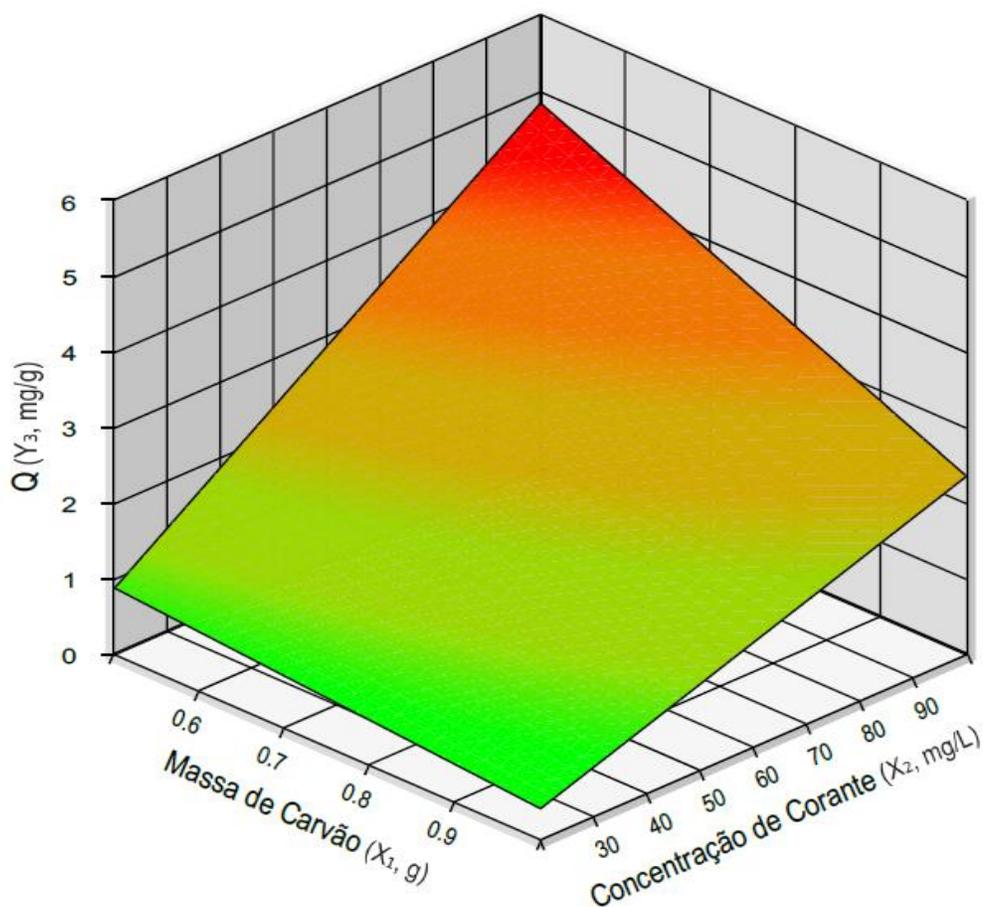
Os resultados obtidos evidenciam que a ANOVA tem elevada significância sobre a precisão do método. A Figura 6 mostra os valores analisados em comparação aos valores pressupostos para o teste de adsorção do índice de azul de metileno.



**Figura 6.** Valores analisados X valores pressupostos da capacidade máxima de adsorção.

O modelo bem ajustado representado pelas proximidades dos pontos a linha central ajustada constata-se que dentro deste intervalo de dados fica condicionado que alterações na variável preditora implica em mudanças na variável resposta. Tal fato também é justificado pelo p-valor baixo presente na análise de regressão.

Na Figura 7 que representa a superfície de resposta, pode-se verificar que a capacidade máxima de adsorção do carvão ativado foi obtida em circunstâncias de baixa quantidade de massa de carvão e alta concentração do corante azul de metileno, conforme ilustra a área em vermelho.



**Figura 7.** Superfície de resposta que representa a capacidade máxima de adsorção do carvão desta pesquisa

## Conclusões

Com base nos resultados apresentados nessa pesquisa (caracterização da biomassa, planejamento experimental, testes de adsorção), conclui-se que:

O teor elevado de material volátil da biomassa de resíduo de poda de flamboyant, mostra que a mesma se encontra adequada para o processo de pirólise.

O processo de pirólise das vagens de flamboyant realizado em diferentes condições proporcionou um melhor ajuste para obtenção de maiores rendimentos da fração sólida. Ao variar a temperatura do processo de 350°C para 550°C notou-se uma redução de 9,5% na massa final de carvão ativado, sendo uma diminuição de 35,49% a 25,99%, respectivamente. Dessa forma, a baixa variação indica um rendimento favorável às condições de trabalho definidas para o ponto central do DFC.

Conforme observado nos resultados do DFC, temperaturas mais elevadas provocam menores rendimentos de carvão quando se comparado a temperaturas mais baixas. Isso ocorre devido ao efeito negativo que a temperatura do processo de pirólise tem no rendimento final de carvão, consoante ao apresentado no Diagrama de Pareto. Dessa forma, a temperatura se apresenta como um importante fator nos processos aos quais se utilizam subprodutos provenientes da pirólise das vagens de flamboyant.

O baixo teor de carbono fixo da biomassa, aliado ao alto teor de material volátil, demonstram que é um material adequado para a produção de carvão, pois quanto maior o teor de material volátil e menor o teor de carbono fixo, mais rápida a combustão acontece.

Após a pirólise, o índice de carbono fixo aumentou para 55.75% no carvão obtido através do processo de pirólise a 350°C e para 64.53% no carvão obtido na pirólise a 550°C, isso demonstra que durante o processo de pirólise, o rearranjo da estrutura converteu a matéria volátil em carbono fixo, o que demonstra a eficiência da pirólise realizada, e a qualidade do carvão obtido. Vale destacar que durante a realização do processo a 350 °C o gasto energético é bem menor quando comparado com a outra temperatura adotada nesta pesquisa (500 °C).

O teste de adsorção de azul de metileno realizado em mesa giratória orbital e posteriormente analisado estatisticamente, resultou que o carvão obtido na pirólise de biomassa do resíduo de poda de flamboyant tem uma alta capacidade de adsorção apresentando em todos os ensaios uma eficiência acima dos 80%.

Além dos bons resultados obtidos, o carvão ativado de resíduo de poda de flamboyant pode ajudar na economia de carvão ativado utilizado em diversos fins, afinal, é uma biomassa de fácil

acesso que é descartada sem nenhum tipo de reaproveitamento, podendo assim, através de programas e parcerias ser feita a aquisição desse material sem custos.

É importante ressaltar que a disposição final destes resíduos em aterros sanitários, apesar de ser legalmente correta, resulta no abarrotamento deste espaço, tendo em vista, que a biomassa estudada tem grande potencial de valor agregado quando reaproveitado.

### Referências bibliográficas

- Andrade, L.A. (2015) *Aproveitamento do caroço de manga: um estudo de viabilidade da pirólise usando energia solar*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, 126 pp.
- Biswas, B., Pandey, N., Bisht, Y., Singh, R., Kumar, J., Bhaskar, T. (2017) Pyrolysis of agricultural biomass residues: Comparative study of corn cob, wheat straw, rice straw and rice husk. *Bioresource Technology*, **237**, 57 – 63 p. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.046>
- Bridgwater A.V. (2012) Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, **38**, 68 – 94 p. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- Chen, G., Liu, C., Ma, W., Zhang, X., Li, Y., Yan, B., Zhou, W. (2014) Co-pyrolysis of corncob and waste cooking oil in a fixed bed. *Bioresource Technology*, **166**, 500 – 507 p. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.090>
- Danish, M., Naqvi, M., Farooq, U., Naqvi, S. (2015) Characterization of South Asian Agricultural Residues for Potential Utilization in Future 'energy mix'. *Energy Procedia*, **75**, 2974 – 2980. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.604>
- Froehlich, P.L. (2014) *Carvão vegetal: propriedades físico-químicas e principais aplicações*. Tese (Doutorado em Ciências), Universidade de São Paulo, 199 p.
- Hossain, M.K., Strezov, V., Nelson, P.F. (2009) Thermal characterisation of the products of wastewater sludge pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **85**, 442 – 446. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.09.010>
- Machado, P.R.S. (2019) *Prospecção de bioprodutos a partir da degradação termoquímica do sabugo de milho visando aplicação industrial*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Tocantins, 85 pp.
- Maia, D. S. (2020) *Aproveitamento do carvão ativado obtido da casca de castanha de caju no processo de tratamento de águas cinzas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Tocantins, 90 pp.
- Marin, P., Borga, C.E., Módones, A.N., Espinoza-Quinones, F.R., de Oliveira, S.P.D., Kroumov, A.D. (2014) Determination of the mass transfer limiting step of dye adsorption onto commercial adsorbent by using mathematical models. *Environmental Technology*, **35**(18), 2356–2364. <https://doi.org/10.1080/09593330.2014.904445>
- Meira, A.M. (2010) *Gestão de resíduos da arborização urbana*. Tese (Doutorado em Ciências), Universidade de São Paulo, 179 pp.
- Mullen, C.A., Boateng, A.A., Goldber, N.M., Lima, I.M., Laird, D.A., Hicks, K.B. (2010) Bio-oil and bio-char production from corn cobs and stover by fast pyrolysis. *Biomass & Bioenergy*, **34**, 67 - 79. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.09.012>
- Nabais, J.V., Carrott, P., Ribeiro Carrott, M.M.L., Luz, V., Ortiz, A.L. (2008) Influence of preparation conditions in the textural and chemical properties of activated carbons from a novel biomass precursor: the coffee endocarp. *Bioresour. Technol.* **99**, 7224-7231 p. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.12.068>

- Paz, E.C.S., Paschoalato, C.F., Arruda, M.G., Silva, G.G., Santos, M.L.G., Pedroza, M.M., Oliveira, L.R.A. (2021) Production and characterization of the solid product of coconut pyrolysis. *Biomass Conversion and Biorefiner.* **11**, 1-13 p. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01561-3>
- Pedroza, M.M., Sousa, J.F., Vieira, G.E.G., Bezerra, M.B.D. (2014) Characterization of the products from the pyrolysis of sewage sludge in 1 kg/h rotating cylinder reactor. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **105**, 108-115. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.10.009>
- Pedroza, M.M., Neves, L.H.D., Paz, E.C.S., Silva, F.M., Rezende, C.S.A., Colen, A.GN., Arruda, M.G. (2021) Activated charcoal production from tree pruning in the Amazon region of Brazil for the treatment of gray water. *Journal of Applied Research and Technology*, **19**, 49-65. <https://doi.org/10.22201/icat.24486736e.2021.19.1.1492>
- Rodrigues, C.R. (2019) *Degradação térmica da casca de arroz e utilização do carvão obtido no processo para polimento de águas cinzas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Tocantins, 72 pp.
- Siebeneichler, E.A., Costa, L.M., Figueredo, N.A., Tronto, J., Rocha, P.A. (2017) Influência de temperatura e taxas de aquecimento na resistência mecânica, densidade e rendimento do carvão da madeira de *Eucalyptus cloeziana*. *Brazilian Journal of Wood Science*, **8**, 82 - 94p. <https://doi.org/10.12953/2177-6830%2FRCM.V8N2P82-94>
- Silva, D.P. (2016) *Avaliação do processo de adensamento de resíduos de poda de árvore visando ao aproveitamento energético: o caso do campus da USP na capital*. Dissertação (Mestrado em Ciências), Universidade de São Paulo, 125 pp.
- Silva, A.S. (2021) *Aplicação de resíduos da indústria de beneficiamento da castanha do Brasil (Bertholletia excelsa) para produção de materiais renováveis por meio da pirólise*. Tese (Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental), Universidade de Ribeirão Preto, 164 pp.
- Tocantins (2017) *Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Tocantins*. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Tocantins, 126 pp.
- Vargas, A.M.M., Cazetta, A.L., Garcia, C.A., Almeida, V.C. (2011) Preparation and characterization of activated carbon from a new raw lignocellulosic material: Flamboyant (*Delonix regia*) pods. *Journal of Environmental Management*, **92**, 178 – 184. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.09.013>
- Veloso, V.L., da Silva, F.B.V., dos Santos, N.M., Nascimento, C.W.A. (2022) Phytoattenuation of Cd, Pb, and Zn in a Slag-contaminated Soil Amended with Rice Straw Biochar and Grown with Energy Maize. *Environmental Management*, **69**, 196 – 212. <https://doi.org/10.1007/s00267-021-01530-6>
- Wu, F.C., Tseng, R.L., Juang, R.S. (2005) Preparation of highly microporous carbons from fir wood by KOH activation for adsorption of dyes and phenols from water. *Separation and Purification Technology*, **47**, 10-19. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2005.03.013>