

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS**

BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

EDUARDO OTONI LOPES CUNHA

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO OBTIDO A PARTIR
DA PIRÓLISE DA CASCA DO PEQUI (*CARYOCAR BRASILIENSE CAMB*)**

PALMAS

2023

EDUARDO OTONI LOPES CUNHA

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO OBTIDO A PARTIR
DA PIRÓLISE DA CASCA DO PEQUI (*CARYOCAR BRASILIENSE CAMB*)**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel no Curso
Superior de Engenharia Civil do Instituto
Federal do Tocantins, Campus Palmas.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes
Pedroza

PALMAS

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

C972p Cunha, Eduardo Otoni Lopes
PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO
OBTIDO A PARTIR DA PIROLÍSE DA CASCA DO PEQUI
(CARYOCAR BRASILIENSE CAMB) / Eduardo Otoni Lopes Cunha. –
Palmas, TO, 2023.
48 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2023.

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

1. Casca do pequi. 2. Pirólise. 3. Carvão ativado. I. Pedroza,
Marcelo Mendes. II. Título.

CDD 624

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins
de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

EDUARDO OTONI LOPES CUNHA

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO OBTIDO A PARTIR DA PIRÓLISE DA CASCA DO PEQUI (*CARYOCAR BRASILIENSE CAMB*)

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do curso
de Engenharia Civil Instituto Federal do
Tocantins - *Campus* Palmas, como
exigência à obtenção do grau em
Engenheiro Civil.

Aprovado em: 09/10/2023

BANCA AVALIADORA

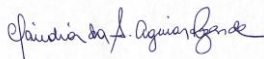


Professor Dr. Marcelo Mendes Pedroza

Orientador (IFTO)



Eng. Me. Ranyere do Nascimento Lôbo



Prof. Dr^a. Cláudia da Silva Aguiar Rezende

Dedico essa conquista primeiramente a Deus, que sempre está ao nosso lado nos dando apoio e protegendo durante toda essa caminhada, em seguida, um agradecimento especial à minha família, Arlete (mãe), Gilson (pai) e Isabela (irmã), que sempre estiveram ao meu lado dando forças e comemorando às pequenas vitórias durante o caminho para a conclusão desse desafio, e aos amigos de curso e de vida que nunca pararam de me dar suporte.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por estar sempre ao meu lado abençoando e apoiando, dando forças para superar todo e qualquer momento de dificuldade.

À minha família, meus pais, Arlete e Gilson, e minha irmã, Isabela, que não mediram esforços para me ajudar durante esses 5 anos de jornada, desafios atrás de desafios que só puderam ser superados com muito apoio daqueles que presenciavam o dia a dia dessa rotina, um muito obrigado, e nós conseguimos!

Aos meus professores ao longo do curso, que se empenharam ao máximo para transmitir seus conhecimentos aos alunos e contribuir positivamente com o aprendizado dos acadêmicos, tendo como objetivo final transformá-los em excelentes profissionais, um muito obrigado.

Aos meus grandes amigos que durante esse tempo deixaram seu legado em minha vida, dando forças e suporte a nunca desistir e manter o foco no objetivo principal, me apoiando nos momentos mais difíceis, e comemorando cada conquista nos momentos mais alegres, obrigado por todos os momentos de descontração, sem vocês isso não seria possível.

CUNHA, Eduardo Otoni Lopes. **Produção e caracterização do carvão ativado a partir da pirólise da casca do pequi (*caryocar brasiliense camb*)**. 2023. 49 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2023.

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de realizar um estudo a respeito da utilização e reaproveitamento da casca do pequi, visando seu uso para a produção de carvão ativado, fruto este que é muito consumido no Brasil, principalmente nas regiões do Centro-Oeste, Norte e Sudeste. Entretanto, o consumo do pequi gera grandes taxas de resíduos, pois sua casca não é muito bem aproveitada e acaba se tornando resíduo sólido, o que provoca alguns impactos ambientais. Desta maneira, a busca por métodos sustentáveis de tratamento destes resíduos e sua reutilização são uma pauta muito constante dentro das discussões no cenário ambiental do país. Visando colaborar com tal questão, o desenvolvimento deste estudo tem o objetivo de submeter a casca do pequi a uma degradação térmica, utilizando-se da técnica da pirólise, a fim de se obter carvão ativado que possa ser usado para outros fins, e desta maneira contribuir de positivamente para a redução dos impactos ambientais frequentes na região de Palmas, Tocantins. A biomassa seca foi caracterizada através de ensaios para teor de umidade (9,22%), teor de cinzas (3,39%), material volátil (81,20%) e teor de carbono fixo (6,19%). A pirólise foi realizada em reator em laboratório sob as temperaturas de 600 e 650°C, a uma taxa de 30°C/min, tendo um rendimento de 26,77% para a amostra pirolisada a 650°C e 28,94% para a amostra a 600°C. Após a obtenção do carvão, foi realizada a caracterização deste produto final conforme os parâmetros para caracterizar a biomassa, mais o teste de adsorção, que contou com o uso do corante azul de metileno, que revelou que a capacidade de adsorção deste carvão se torna maior com uma menor quantidade de massa e uma maior concentração de corantes. Sendo assim, a análise dos resultados nos mostra a eficiência do carvão ativado obtido através da casca do pequi no processo da adsorção.

Palavras-chave: Casca do pequi, resíduos sólidos, impacto ambiental, pirólise, carvão ativado.

ABSTRACT

The aim of this work is to carry out a study on the use and reuse of pequi bark to produce activated charcoal. This fruit is widely consumed in Brazil, especially in the Midwest, North and Southeast regions. However, the consumption of pequi generates large amounts of waste, as its bark is not used very well and ends up becoming waste, which causes some environmental impacts. In this way, the search for sustainable methods of treating this waste and reusing it is a constant topic of discussion in the country's environmental scenario. In order to corroborate this issue, this study aims to subject pequi bark to thermal degradation, using the pyrolysis technique, in order to obtain activated charcoal that can be used for other purposes, and thus make a positive contribution to reducing the frequent environmental impacts in the region of Palmas, Tocantins. The dry biomass was characterized through tests for moisture content (9.22%), ash content (3.39%), volatile material (81.20%) and fixed carbon content (6.19%). Pyrolysis was carried out in a laboratory reactor at temperatures of 600 and 650°C, at a rate of 30°C/min, with a yield of 26.77% for the sample pyrolyzed at 650°C and 28.94% for the sample at 600°C. After obtaining the charcoal, the final product was characterized according to the biomass characterization parameters, as well as an adsorption test using methylene blue dye. This test revealed that the adsorption capacity of this charcoal increases with a lower mass and a higher dye concentration. Thus, the analysis of the results demonstrates the efficiency of the activated charcoal obtained from pequi peel in the adsorption process.

Key Words: Pequi peel, waste, environmental impact, pyrolysis, activated charcoal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Aspecto morfológico do pequi.....	16
Figura 2: Procedimentos realizados no experimento	19
Figura 3: Biomassa utilizada, armazenada e descrita em seu recipiente.....	20
Figura 4: Estufa usada para realizar a secagem da amostra	20
Figura 5: Imagem que representa a mufla	21
Figura 6: Pesagem da amostra antes de ser pirolisada	23
Figura 7: Reator ao qual a barca com o material foi inserida para realização da pirólise	23
Figura 8: Autoclave, responsável pela geração do vapor d'água.....	24
Figura 9: Temperatura ideal para o bom funcionamento do ensaio, 133°C	24
Figura 10: Aparelhagem utilizada para o processo de pirólise.....	25
Figura 11: Mesa agitadora.	26
Figura 12: Frasco de azul de metileno de concentração 100mg/L.....	27
Figura 13: Amostra em recipiente de azul de metileno (30 ml).....	27
Figura 14: Esquema para filtração da mistura.....	28
Figura 15: Espectrofotômetro.....	28
Figura 16: Cadinho com material no interior do forno mufla	32

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Variáveis empregadas para ensaio de adsorção	27
Quadro 2: Dosagem de carvão por ensaio e respectiva concentração do corante	27
Quadro 3: Dados iniciais para ensaios utilizando biomassa <i>in natura</i>	28
Quadro 4: Dados iniciais para ensaios utilizando carvão que foi obtido na pirólise a 600°C	28
Quadro 5: Dados iniciais para ensaios utilizando carvão que foi obtido na pirólise a 650°C	28
Quadro 6: Quadro de resultados do ensaio de umidade da biomassa e carvão.....	29
Quadro 7: Quadro de resultados do ensaio de teor de cinzas da biomassa e carvão	30
Quadro 8: Quadro de resultados do ensaio de material volátil da biomassa e carvão....	31
Quadro 9: Quadro de resultados do teor de carbono fixo da biomassa e carvão	33
Quadro 10: Balanço de massa e rendimento do carvão obtido	34
Quadro 11: Resultados obtidos a partir do ensaio de adsorção	34
Quadro 12: Coeficientes de regressão para modelo amostral de definição da absorvância	35
Quadro 13: Resultado da absorvância das amostras por ANOVA	37
Quadro 14: Coeficientes de regressão para modelo amostral de definição da razão de adsorção.....	40

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Influência das variáveis sobre a absorbância.....	36
Gráfico 2: Gráfico de predição de resultados (Estipulado x Obtido).....	37
Gráfico 3: Nível de absorbância em relação a concentração de corante e massa de carvão.....	38
Gráfico 4: Relação da concentração de corante com a massa de carvão.....	39
Gráfico 5: Influência das variáveis sobre a razão de adsorção.....	41
Gráfico 6: Gráfico de predição de resultados (Estipulado x Obtido).....	42
Gráfico 7: Nível da capacidade de adsorção em relação a concentração de corante e massa de carvão	43
Gráfico 8: Relação da concentração de corante com a massa de carvão	44

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Problema de pesquisa	14
1.2 Justificativa.....	14
1.3 Objetivos	15
1.3.1 Objetivo geral	15
1.3.2 Objetivos específicos	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 O pequi: uma fruta típica do cerrado brasileiro	15
2.2 Disputas no âmbito diplomático pela posse do pequi.....	16
2.3 Pirólise da biomassa.....	17
2.4 Produção de carvão ativado a partir da pirólise do pequi	18
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	18
3.1 Coleta do material	19
3.2 Caracterização da biomassa.....	20
3.2.1 Umidade	20
3.2.2 Teor de cinzas	21
3.2.3 Material volátil.....	22
3.2.4 Teor de carbono fixo.....	22
3.3 Pirólise do material	23
3.4 Caracterização do carvão obtido	25
3.4.1 Umidade	25
3.4.2 Teor de cinzas	25
3.4.3 Material volátil.....	26
3.4.4 Teor de carbono fixo.....	26
3.4.5 Adsorção	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
4.1 Umidade.....	30
4.2 Teor de cinzas.....	31
4.3 Material volátil.....	32
4.4 Teor de carbono fixo	34
4.5 Balanço de massa e rendimento	34

4.6 Adsorção	35
4.6.1 Primeira resposta: absorbância.	35
4.6.2 Segunda resposta: razão de adsorção	39
CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
REFERÊNCIAS.....	44

1. INTRODUÇÃO

O aumento desenfreado do número populacional nos últimos anos tem provocado consequentemente um aumento na geração de resíduos provenientes da produção de alimentos, sejam eles de qualquer tipologia. Desta maneira, medidas são diariamente discutidas no cenário político-ambiental do Brasil a fim de criar alternativas sustentáveis para descarte e reutilização destes resíduos. Somado a esta problemática, o aumento no consumo de combustíveis fósseis, como carvão e petróleo, durante o século XXI, por conta dos grandes avanços científicos e tecnológicos, tem trazido à tona a busca por fontes de produção de energia limpa (SCHNEIDER, 2018).

Nesse contexto, são grandes os esforços desenvolvidos pelas entidades governamentais, institutos de pesquisas, entre outros, para se produzir energia através da biomassa. Esta biomassa pode ser composta de diversos materiais provenientes de vegetais naturais, resíduos urbanos, cultivo agrícola, como por exemplo os óleos naturais, cascas de frutos, entre outros (GUITARRARA, 2023).

No Estado do Tocantins, um dos principais componentes dos resíduos que são gerados e descartados é a casca do Pequi, *Caryocar brasiliense camb*, fruto típico e abundante na região que é utilizado de maneira recorrente na gastronomia, no entanto para que possa ser usado para consumo, sua casca é totalmente retirada e acaba indo diretamente para o lixo, sem possibilidade de reuso, representando cerca de 32,77% de resíduo (PEREZ, 2004).

Desta forma, uma alternativa viável para o reaproveitamento deste resíduo, é a sua transformação em carvão ativado. Este produto, por sua vez, possui inúmeras possibilidades de aplicação após produzido, o que faz dessa alternativa muito viável economicamente. O carvão ativado por ser um bom adsorvente para separação e remoção de impurezas de efluentes e eliminação de odores, é bastante utilizado na indústria alimentícia, farmacêutica, recuperação de solventes, tratamento de água potável, entre outras (SILVA; LIMA; MESSIAS, 2014).

Para que se possa realizar a produção deste carvão ativado, a casca do pequi é submetida ao processo de pirólise, que é um processo de degradação térmica

realizado isento de oxigênio, o que significa que não há queima envolvida, o que evita a produção de toxinas e outros gases poluentes (VELMURUGAN, 2021).

1.1 Problema de pesquisa

As projeções populacionais para o futuro indicam crescimento acelerado nos próximos anos, logo, o consumo de alimentos no geral também se eleva, promovendo, consequentemente, um aumento na geração de resíduos provenientes deste consumo (SAATH, 2018). Associado a este fato, a busca por alternativas sustentáveis de produção de energia elétrica se mostrou ativa nos últimos anos, já que as fontes de energia não renováveis estão se esgotando .

Diante desta problemática, seria possível e viável, economicamente e ambientalmente, a utilização dos resíduos gerados a partir do consumo do pequi, *Caryocar brasiliense camb*, para produção de carvão ativado por meio da pirólise?

1.2 Justificativa

Dentre as espécies típicas do cerrado que mais se destacam encontra-se o pequi, *Caryocar brasiliense camb*, o qual é conhecido por seu valor econômico e nutricional, além da sua importância regional devido ao alto consumo de frutos e derivados pela população (CÔRREA *et al.*, 2008, MOURA *et al.*, 2013). Advindo deste cenário, a geração de resíduos proveniente deste consumo também é grande, ainda mais pelo fato de que praticamente toda a sua casca é destinada ao lixo, e esta compõe cerca de 76,7% do fruto (VERA *et al.*, 2005).

Sob esta ótica, vê-se que a utilização da casca do pequi, que é descartada, para a produção de carvão ativado pode ser uma alternativa bastante funcional e benéfica, contribuindo na descoberta de novas fontes sustentáveis e limpas de produção de energia, e colaborando também para a redução na geração final de resíduos. Tais fatores colaboraram para o interesse de pesquisa e submissão de tal biomassa à ensaios de pirólise para obtenção do carvão, dado que o processo tem o objetivo de obter produtos com alta densidade energética e propriedades melhores que as iniciais (OLIVARES-GÓMEZ, 2023).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

- Utilizar a casca do pequi para a obtenção de carvão ativado por meio da técnica da pirólise.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar a biomassa residual a ser utilizada;
- Realizar o processo da pirólise utilizando-se de mecanismos laboratoriais a fim de se obter carvão ativado;
- Caracterizar o material adsorvente final obtido, comparando-o com resultados encontrados em literatura.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O pequi: uma fruta típica do cerrado brasileiro

O pequizeiro é uma espécie vegetal oriunda do Cerrado, presente principalmente nos estados de Goiás, Tocantins e Minas Gerais. Seu nome tem origem no Tupi “pyqui”, em que “py” significa casca e “qui” significa espinho, o que se refere aos espinhos da parte interna do fruto, o endocarpo (AQUINO; AGUIAR, 2006).

O fruto do pequizeiro é constituído por um exocarpo, um mesocarpo externo e um mesocarpo interno, que se refere à parte comestível do fruto e que apresenta uma coloração amarelada e com um forte odor característico. O endocarpo espinhoso é associado ao mesocarpo interno, e serve para proteger sua semente, que também é uma porção comestível do fruto (Figura 1) (ALMEIDA, 1998; SILVA *et al.*, 1994).

Figura 1: Aspecto morfológico do pequi.



Fonte: Alves *et al.* (2012).

Segundo Ribeiro (2007), o pequi se apresenta como um fruto rico em vitamina A, além de fornecer óleos comestíveis e licores únicos, desta forma, por ser bastante abundante, tem sido cada vez mais explorado na culinária regional, demonstrando assim grande valor gastronômico e econômico. Este fruto é de base extrativista e se apresenta como uma boa fonte de alimento e de renda para diversas famílias, tanto do meio rural como do meio urbano (SANTOS *et al.*, 2013).

2.2 Disputas no âmbito diplomático pela posse do pequi

A posse do pequi se tornou muito discutido entre alguns Estados Brasileiros pelo fato de que o fruto conquistou grande valor cultural e socioeconômico, simbolizando a diversidade do cerrado (RIBEIRO, 2021). Nesta disputa, que se estendeu aos campos diplomáticos do Congresso Nacional, estão inseridos os Estados de Minas Gerais, Goiás e Tocantins, embora o pequi seja bastante presente nessas regiões, segundo Ribeiro (2021), Minas Gerais leva vantagem por ser o maior produtor de pequi e de seus derivados do Brasil.

Essa disputa é proveniente das inúmeras possibilidades que se tem com o fruto do pequizeiro. As atividades extrativas se aprimoraram e hoje em dia, certos empreendimentos vendem pequis congelados mesmo fora da época de sua safra, por exemplo. Além disso, o fruto tem sido muito utilizado em farinhas, fármacos, óleos, castanhas e conservas (RIBEIRO, 2021).

Mesmo conquistando o apelido de “ouro do cerrado”, o comércio e a economia que gira em torno do pequi ainda tem sua base informal, o que favorece inúmeros pequenos e médios comerciantes a conseguirem uma forma de sustento (RIBEIRO, 2021).

2.3 Pirólise da Biomassa

A pirólise é um procedimento de degradação de um material através da energia térmica (SILVÉRIO; BARBOSA; PILÔ-VELOSO, 2008), feita com ausência parcial ou total de oxigênio (FOGAÇA, 2023). Sendo assim, ela se apresenta como uma técnica bastante eficaz e limpa para melhorar a destinação final da maioria dos resíduos que são gerados. Essa é uma tecnologia que permite a transformação da biomassa residual em elementos que se tornam muito úteis quando utilizados, como por exemplo os combustíveis, que podem ser usados para produção de energia elétrica, material adsorvente para filtragem de água residuais ou nas mais variadas linhas de produção industrial (PEREIRA, 2022).

Esse processo da pirólise geralmente é realizado entre uma faixa de temperatura de 400 a 1200°C (NEVES *et al*, 2011). Diante disso, existem alguns tipos de pirólise que são baseadas nos diferentes “grupos de temperatura”, dentre esses tipos têm-se a pirólise rápida, a pirólise lenta e a pirólise instantânea. A primeira é realizada em uma ampla faixa de temperatura, entre 450-850°C, um curto tempo de residência de vapor e uma alta taxa de aquecimento por minuto (10-200°C/s), e o seu principal produto final é o bio-óleo. A pirólise lenta, por sua vez, é caracterizada por uma taxa de aquecimento mais demorada (0,1–10°C/s) e um tempo de residência de vapor mais longo, esse processo é conhecido também como carbonização e o seu principal produto final é o carvão sólido. Por fim, a pirólise instantânea é caracterizada por taxas de aquecimento extremamente altas, acima de 1000°C, e tempo de residência de vapor curto (PEREIRA; NASCIMENTO; SILVA, 2022).

Para a realização da pirólise é necessária uma série de equipamentos específicos e de qualidade para que seja executada com alta eficiência. O reator é o principal deles, onde todas as reações químicas acontecem (UDDIN *et al*, 2018; BASU, 2018), sendo realizadas com a ausência de oxigênio. Além do reator, existem

uma série de instrumentos que são imprescindíveis para a realização da pirólise, tais ferramentas serão abordadas futuramente neste trabalho.

2.4 Produção de carvão ativado a partir da pirólise do pequi

Uma característica muito importante do carvão ativado que vem sendo amplamente explorada, é a sua capacidade de adsorção. A adsorção nada mais é do que o processo de remoção de diferentes tipos de poluentes e cheiros de algum material, e é muito vantajoso pois requer baixo custo e permite a reutilização do carvão (INCE; APIKYAN, 2000).

Entretanto, para que o carvão possua essa propriedade adsorvente, ele passa por um processo subsequente à pirólise, que é a ativação. Tal processo busca submeter o material a reações secundárias a fim de obter um material mais poroso e com maior área superficial (WIGMANS, 1989). A ativação pode acontecer por meio de processos físicos ou químicos, a primeira envolve a carbonização do material e a ativação por meio de temperaturas elevadas, entre 800°C a 1100°C, e ainda sob a ação de vapores, como por exemplo vapor de água (H₂O) (ROCHA; LUZ; LENA, 2006). Por sua vez, a ativação química é feita a partir da união do material ainda não pirolisado com agentes desidratantes, como o ácido sulfúrico, após isso faz-se a carbonização em temperaturas entre 400°C e 900°C (MORENO-CASTILHA *et al.*, 2001).

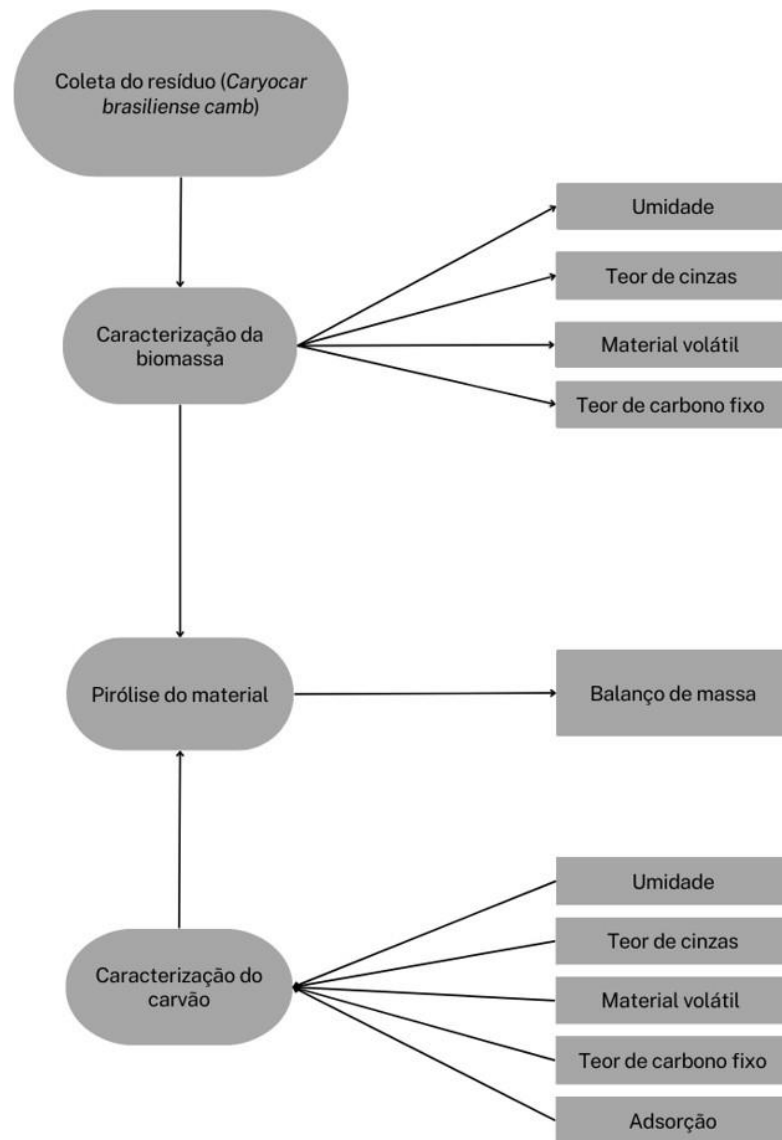
Utilizando-se do pequi como matéria-prima para a obtenção de carvão ativado, Patias *et al.* (2015) concluiu que esse produto final apresentou boas características na adsorção do corante azul de metileno, apresentando rendimento em massa de 7% e poder de adsorção de até 68%. Por sua vez, Brandão *et al.* (2017) encontrou que a alta capacidade de adsorção decorre em função da elevada área superficial do carvão obtido, sendo influenciada pelo agente ativante, modo de ativação e natureza do adsorvente.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O processo experimental da transformação do pequi no carvão ativado será feito no Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN), situado no Instituto Federal do Tocantins (IFTO), *campus* Palmas. O conteúdo abaixo tratará da preparação, materiais e equipamentos

utilizados e os procedimentos da pirólise para a obtenção do carvão ativado, assim como mostra a Figura 2.

Figura 2: Procedimentos realizados no experimento.



Fonte: Autor (2023).

3.1 Coleta do material

A casca do pequi a ser usada para o experimento é proveniente de um estudo realizado pelo acadêmico Mateus Rodrigues Brito, ao qual ela foi transformada em pó por meio de um processo em que as cascas foram secas em estufas a 60°C, e posteriormente moídas em um moinho de facas Willye, depois de trituradas, foram armazenadas em recipientes fechados, como mostrados na Figura 3 (BRITO, 2021).

Figura 3: Biomassa utilizada, armazenada e descrita em seu recipiente.



Fonte: Autor (2023).

3.2 Caracterização da biomassa

Para realizar a caracterização da biomassa a ser utilizada, alguns procedimentos são indispensáveis, e por meio deles determina-se umidade, o teor de cinzas, o material volátil, o teor de carbono fixo, a densidade e cinética de perda de massa do material.

3.2.1 Umidade

O teor de umidade foi determinado de acordo com a norma ASTM D 3173-87. Foi aquecida certa quantidade de biomassa, em torno de 1g (Sanchez *et al.*, 2009), dentro de um cadinho que foi colocado dentro da estufa (Figura 4) a uma temperatura de 110°C durante uma hora.

Posteriormente, o material foi colocado em um dessecador durante o tempo de 15 minutos e depois pesado. E para a obtenção da umidade do material será empregada a Equação 1:

$$Umidade (\%) = \left(\frac{x-y}{p} \right) * 100\% \quad \text{(Equação 1)}$$

Em que:

x = peso do cadinho vazio + peso da amostra (em gramas);

y = peso do cadinho + peso amostra pós-aquecimento na estufa (em gramas);

p = peso da amostra (em gramas).

Figura 4: Estufa usada para realizar a secagem da amostra.



Fonte: Autor (2023).

3.2.2 Teor de cinzas

Para determinação do teor de cinzas, obedeceu-se a norma ASTM D 3174-04. Foi utilizada a mesma fórmula que usada para umidade, porém anteriormente à pesagem o material passou pela mufla, a uma temperatura de 710°C durante 1 hora, mostrada na Figura 5.

Figura 5: Forno mufla.



Fonte: Autor (2023).

Após sair da mufla, o material foi para o dessecador, onde ficou por 1 hora para se esfriar, e depois foi realizada a pesagem. Depois de registradas todas as pesagens e conferências, foi utilizada a Equação 2:

$$\text{Teor de cinzas } (\%) = \left(\frac{x-y}{p} \right) * 100\% \quad \text{(Equação 2)}$$

Em que:

x = peso do cadinho vazio + peso da amostra (em gramas);

y = peso do cadinho + peso amostra pós-aquecimento na estufa (em gramas);

p = peso da amostra (em gramas).

3.2.3 Material Volátil

A norma que vai regir a determinação do material volátil é a ASTM D 3175-07. O material passou pela mufla em temperatura e tempos distintos dos demais testes, a amostra foi submetida a uma temperatura de 850°C durante 7 minutos. Logo após o fim do aquecimento, serão feitas as pesagens e a utilização da Equação 3:

$$\text{Material volátil } (\%) = \left(\frac{x-y}{p} \right) * 100\% \quad \text{(Equação 3)}$$

Em que:

x = peso do cadinho vazio + peso da amostra (em gramas);

y = peso do cadinho + peso amostra pós-aquecimento na estufa (em gramas);

p = peso da amostra (em gramas).

3.2.4 Teor de Carbono Fixo

O teor de carbono fixo depende diretamente do teor de material volátil (CHAVES, A. M. B., *et al*, 2013), e foi encontrado através dos resultados dos testes anteriores, como mostrado na Equação 4:

$$\text{Carbono Fixo } (\%) = 100 - [\text{Umidade } (\%) - \text{Teor de cinzas } (\%) - \text{Material volátil } (\%)] \quad \text{(Equação 4)}$$

3.3 Pirólise do material

O material a ser pirolisado foi colocado em uma barca e pesado em uma balança de precisão (Figura 6), e posteriormente esta barca foi inserida dentro de um reator termoelétrico (Figura 7).

Figura 6: Pesagem da amostra antes de ser pirolisada.



Fonte: Autor (2023).

Figura 7: Reator ao qual a barca com o material foi inserida para realização da pirólise.



Fonte: Autor (2023).

Para o início do procedimento, configurou-se as temperaturas desejadas de aquecimento da matéria e a taxa de aquecimento, além do tempo que a amostra estará submetida à conversão térmica. Além disso, enquanto a amostra estava no interior do reator, ela sofreu com a ação do arraste do vapor d'água proveniente da autoclave (Figura 8), vapor este que estava com temperatura média de 133°C (Figura 9).

Figura 8: Autoclave, responsável pela geração do vapor d'água.



Fonte: Autor (2023).

Figura 9: Temperatura ideal para o bom funcionamento do ensaio, 133°C.



Fonte: Autor (2023).

Para realizar a liberação da passagem por completo desse vapor d'água, primeiro foi realizado a vazão no primeiro trecho da tubulação, limitado por 2 válvulas,

até que este não apresente mais a saída de água condensada, ou seja, até que esteja em temperatura ideal para o vapor d'água. Depois que o primeiro trecho apresentar temperatura ideal, a segunda válvula foi levemente aberta para que o último trecho se aquecesse da mesma maneira, e assim o vapor adentrar no interior do reator. A Figura 10 representa todos os componentes que foram utilizados no processo da pirólise.

Figura 10: Aparelhagem utilizada para o processo de pirólise.



Fonte: Autor (2023).

No caso deste experimento, foram determinadas duas temperaturas ao qual a amostra irá ser submetida, 650 e 600°C, ambas com taxa de aquecimento à 30°C/min.

3.4 Caracterização do carvão obtido

A caracterização do produto final é semelhante com a caracterização da biomassa

3.4.1 Umidade

O teor de umidade foi determinado utilizando o método descrito em 3.2.1, em conformidade com a norma ASTM D 3173-87.

3.4.2 Teor de cinzas

O teor de cinzas foi determinado seguindo o método descrito em 3.2.2, em conformidade com a norma ASTM D 3174-04

3.4.3 Material Volátil

Para se determinar a porcentagem de material volátil, o método descrito em 3.2.3 foi utilizado, em conformidade com a norma ASTM D 3175-07.

3.4.4 Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo foi determinado conforme descrito no item 3.2.4.

3.4.5 Adsorção

O ensaio de adsorção foi realizado por meio de um aparelho denominado mesa agitadora TE141, da marca TECNAL (Figura 11), ensaiado com o carvão obtido a 600°C, com tempo de duração de ensaio de 20 minutos.

Figura 11: Mesa agitadora.



Fonte: Autor (2023).

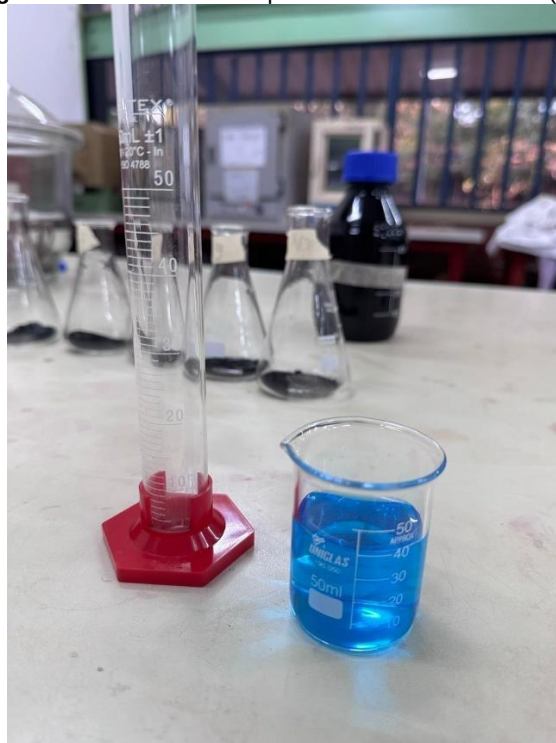
Antes de colocar os frascos na mesa agitadora, foi separado 11 recipientes com diferentes medidas de massa do carvão obtido, entre elas 0,20g, 0,50g e 0,80g. Depois de separados, foi acrescentado cerca de 30mL do corante azul de metileno (Figura 12 e 13), em diferentes concentrações, 20mg/L, 60mg/L e 100mg/L, como solução da amostra.

Figura 12: Frasco de azul de metileno de concentração 100mg/L.



Fonte: Autor (2023).

Figura 13: Amostra em recipiente de azul de metileno (30 ml).



Fonte: Autor (2023).

Depois do processo de agitação, a mistura resultante foi submetida a uma filtragem em um outro aparelho por meio de filtros de papel (Figura 14), e depois de

filtradas passaram pelo espectrofotômetro (Figura 15), que é um aparelho cujo objetivo é determinar a concentração resultante de azul de metileno pós-filtragem por meio de um processo de espectrofotometria.

Figura 14: Esquema para filtração da mistura.



Fonte: Autor (2023).

Figura 15: Espectrofotômetro.



Fonte: Autor (2023).

Com a utilização do software Protimiza Experimental Design, os resultados do ensaio de adsorção foram analisados e registrados a partir da inserção dos dados

usados na parte experimental, no caso a dosagem de carvão e a concentração do corante. Sendo assim, tem-se os seguintes quadros de dados (Quadros 1 e 2).

Quadro 1: Variáveis empregadas para ensaio de adsorção.

Variável	Unidade	Código	Nível		
			-1	0	1
Massa do carvão	g	1	0,20	0,50	0,80
Concentração de corante	mg/L	2	20	60	100

Fonte: Autor (2023).

Quadro 2: Dosagem de carvão por ensaio e respectiva concentração do corante.

Ensaio	Variáveis	
	Massa do carvão (g)	Concentração de corante (mg/L)
1	0,20	20
2	0,80	20
3	0,20	100
4	0,80	100
5	0,20	60
6	0,80	60
7	0,50	20
8	0,50	100
9	0,50	60
10	0,50	60
11	0,50	60

Fonte: Autor (2023).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Abaixo serão demonstrados todos resultados dos experimentos e ensaios feitos com a utilização da casca de pequi, bem como a caracterização da biomassa em seu estado natural, e dos carvões obtidos a partir da pirólise a 600 e 650°C. Nos Quadros

3, 4 e 5, serão apresentados os dados iniciais referentes ao peso da amostra que foi usada para todos os ensaios.

Quadro 3: Dados iniciais para ensaios utilizando biomassa *in natura*.

BIOMASSA		
Amostra	Peso do cadinho vazio (Po) (g)	Peso da amostra (g)
C1	31,6693	1,1847
C2	33,3270	0,9792
C3	34,4276	0,9974

Fonte: Autor (2023).

Quadro 4: Dados iniciais para ensaios utilizando carvão que foi obtido na pirólise a 600°C.

CARVÃO OBTIDO A 600°C		
Amostra	Peso do cadinho vazio (Po) (g)	Peso da amostra (g)
C1	33,2891	0,9439
C2	33,9495	0,9937
C3	33,5079	1,0004

Fonte: Autor (2023).

Quadro 5: Dados iniciais para ensaios utilizando carvão que foi obtido na pirólise a 650°C.

CARVÃO OBTIDO A 650°C		
Amostra	Peso do cadinho vazio (Po)	Peso da amostra
C1	32,4493	0,9840
C2	34,7422	0,9616
C3	33,0574	0,9426

Fonte: Autor (2023).

4.1 Umidade

No ensaio de umidade da biomassa e dos carvões obtidos, obteve-se os resultados que estão mostrados no Quadro 6. Foi realizado o experimento utilizando-se de aproximadamente 1g de material, que foi colocado em um cadinho e posteriormente dentro da estufa a 110°C por 1 hora.

Quadro 6: Quadro de resultados do ensaio de umidade da biomassa e carvão.

UMIDADE						
Amostra		Peso do cadinho + amostra	Peso do cadinho + amostra a 710°C	Peso do cadinho + amostra a 850°C	Teor de umidade (%)	Teor de umidade média (%)
Biomassa	C1	32,854	31,7077	31,7986	9,22	9,22
	C2	34,3062	33,3595	33,4364	9,3	
	C3	35,425	34,4635	34,491	9,14	
Carvão a 600°C	C1	34,233	33,3649	33,842	4,98	4,89
	C2	34,9432	34,0585	34,519	4,78	
	C3	34,5083	33,6173	34,1633	4,91	
Carvão a 650°C	C1	33,4333	32,5673	31,7986	6,9	6,73
	C2	35,7038	34,8584	33,4364	6,85	
	C3	34	33,173	34,491	6,45	

Fonte: Autor (2023).

Durante a combustão de uma biomassa o teor de umidade não deve ser superior a 25%, pois umidades elevadas reduzem o valor do calor de combustão, a temperatura da câmara de queima e a temperatura dos gases de escape (LADEIRA; SANDI; PUGET, 2016, apud FARINHAQUE, 1981, p. 13). Além disso, conforme Almeida (2008) o teor de umidade recomendável para biomassas a fim de que seja realizada a pirólise e outros processos termoquímicos é uma porcentagem inferior a 10%, o que mostra que o resultado obtido é satisfatório e a casca do pequi após o processo de secagem se torna uma boa biomassa para degradação termoquímica, visto que foi obtido um teor de umidade de 9,22%.

Segundo Silva (2009), a umidade pode acabar afetando a eficiência dos carvões na adsorção, pois os poros do carvão ativado ficam preenchidos por moléculas de água, e o valor usual máximo para esse teor de umidade é de 10%, logo vê-se que os resultados obtidos se mostraram promissores (4,89% e 6,73%), ambos abaixo do valor máximo recomendado.

4.2 Teor de cinzas

No ensaio para se determinar o teor de cinzas, obteve-se os resultados que estão mostrados no Quadro 7.

Quadro 7: Quadro de resultados do ensaio de teor de cinzas da biomassa e carvão.

TEOR DE CINZAS						
Amostra		Peso do cadinho + amostra	Peso do cadinho + amostra a 710°C	Peso do cadinho + amostra a 850°C	Teor de Cinzas (%)	Teor de cinzas média (%)
Biomassa	C1	32,854	31,7077	31,7986	3,2413	3,39
	C2	34,3062	33,3595	33,4364	3,3190	
	C3	35,425	34,4635	34,491	3,5994	
Carvão a 600°C	C1	34,233	33,3649	33,842	8,0305	9,98
	C2	34,9432	34,0585	34,519	10,9691	
	C3	34,5083	33,6173	34,1633	10,9356	
Carvão a 650°C	C1	33,4333	32,5673	33,0988	11,9919	12,11
	C2	35,7038	34,8584	35,3295	12,0840	
	C3	34	33,173	33,6833	12,2640	

Fonte: Autor (2023).

Foi realizado o experimento utilizando-se uma quantidade de material que ficou no forno mufla, a uma temperatura de 710°C durante 1 hora. Como pode ser visto na Figura 15:

Figura 16: Cadinho com material no interior do forno mufla.

Fonte: Autor (2023).

Segundo Matos *et al.* (2006), em ensaios acima de 600°C o teor de cinzas pode ser determinado e se refere aos sais minerais e as impurezas presentes na amostra. Além disso, segundo Vale *et al.* (2011) valores de teor de cinza acima de 7% para as biomassas podem ser prejudiciais e influenciarem negativamente no processo da combustão, logo, pode-se perceber que a casca do pequi se apresenta como uma eficiente biomassa.

Lopes *et al.* (2013) verificou por meio de ensaios que o teor de cinzas do carvão ativado comercial foi de 15,20%, logo fazendo uma breve comparação com os resultados obtidos, pode-se perceber que os carvões provenientes da pirólise da casca do pequi a 600 e 650°C obtiveram bons resultados de teor de cinza, 9,98% e 12,11% respectivamente.

4.3 Material volátil

O teor de material volátil representa a porcentagem de material que volatiliza quando submetidas a altas temperaturas (SEYE; PEREIRA, 2014), ou seja, quanto maior a sua porcentagem melhor o resultado, pois indica que o material apresenta boa reação ao processo da pirólise, fazendo com que esta ocorra mais rapidamente. Os dados e resultados obtido do ensaio de material volátil da biomassa e dos carvões obtidos estão apresentados no Quadro 8.

Quadro 8: Quadro de resultados do ensaio de material volátil da biomassa e carvão.

MATERIAL VOLÁTIL						
Amostra		Peso do cadinho + amostra	Peso do cadinho + amostra a 710°C	Peso do cadinho + amostra a 850°C	Material Volátil (%)	Material volátil médio (%)
Biomassa	C1	32,854	31,7077	31,7986	79,8	81,20
	C2	34,3062	33,3595	33,4364	79,5	
	C3	35,425	34,4635	34,491	84,3	
Carvão a 600°C	C1	34,233	33,3649	33,842	36,42	34,54
	C2	34,9432	34,0585	34,519	37,7	
	C3	34,5083	33,6173	34,1633	29,5	
Carvão a 650°C	C1	33,4333	32,5673	33,0988	27,09	28,66
	C2	35,7038	34,8584	35,3295	32,2	
	C3	34	33,173	33,6833	26,69	

Fonte: Autor (2023).

Para este experimento, o material foi submetido ao forno mufla a uma temperatura de 850°C durante 7 minutos. Logo, a partir da análise dos resultados registrados após o ensaio, percebe-se que a biomassa tem um bom teor de material volátil (81,20%).

Tal valor obtido se aproxima muito do resultado encontrado por Moraes *et al* (2016), que foi de 85,26%. Por outro lado, segundo Yosup (2021) os carvões resultantes logicamente apresentam menores teores de material volátil pois boa parte do material é eliminado durante o processo de carbonização, e neste ensaio os resultados foram de 34,54% para o carvão obtido a 600°C e de 28,66% para o carvão obtido a 650°C.

4.4 Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo é relacionado à porcentagem que não é eliminada no aquecimento. Os resultados obtidos no ensaio de teor de carbono fixo da biomassa e dos carvões obtidos foram determinados por meio de uma equação que envolvia os outros três termos citados acima, conforme Equação 4, e são apresentados no Quadro 9.

Quadro 9: Quadro de resultados do teor de carbono fixo da biomassa e carvão.

TEOR DE CARBONO FIXO						
Amostra		Peso do cadinho + amostra	Peso do cadinho + amostra a 710°C	Peso do cadinho + amostra a 850°C	Carbono fixo (%)	Teor de carbono fixo médio (%)
Biomassa	C1	32,854	31,7077	31,7986	7,7387	6,19
	C2	34,3062	33,3595	33,4364	7,8810	
	C3	35,425	34,4635	34,491	2,9606	
Carvão a 600°C	C1	34,233	33,3649	33,842	50,5695	50,59
	C2	34,9432	34,0585	34,519	46,5509	
	C3	34,5083	33,6173	34,1633	54,6544	
Carvão a 650°C	C1	33,4333	32,5673	33,0988	54,0181	52,49
	C2	35,7038	34,8584	35,3295	48,8660	
	C3	34	33,173	33,6833	54,5960	

Fonte: Autor (2023).

A partir da análise dos resultados, vê-se que durante a pirólise, há a liberação de boa parte dos compostos, ou seja, possuem uma fácil degradação térmica, e a outra parte é a que ficou retida e está presente na forma de cinzas e voláteis.

4.5 Balanço de massa e rendimento

No Quadro 10 tem-se os valores obtidos para o rendimento do carvão quando pirolisado a 600°C.

Quadro 10: Balanço de massa e rendimento do carvão obtido.

Temperatura de pirólise (°C)	Recipiente vazio (g)	Massa inicial do conjunto (g)	Massa inicial do material (g)	Massa final do conjunto (g)	Massa carvão (g)	Rendimento do carvão (%)
600	61,65	119,5	57,85	78,39	16,74	28,94
650	61,02	124,49	63,47	78,01	16,99	26,77

Fonte: Autor (2023).

Após a realização do ensaio de pirólise, foi registrado a massa do carvão resultante a fim de se calcular seu rendimento, e o resultado obtido foi de 28,94% de

rendimento para o carvão pirolisado a 600°C. Paz *et al.* (2018) realizaram a pirólise da fibra de coco utilizando-se de uma temperatura de 550°C, e obtiveram um rendimento resultante para o carvão de 35,57%, logo, fazendo um comparativo de resultados percebe-se que o valor de rendimento do carvão é inversamente proporcional à temperatura da pirólise.

4.6 Adsorção

Para o ensaio de adsorção com o carvão ativado proveniente da pirólise da biomassa da casca do pequi (600°C), foi obtido como resultado os parâmetros de absorvância (Y_1) e capacidade de adsorção (Q), dado em mg/g, conforme Quadro 11.

Quadro 11: Resultados obtidos a partir do ensaio de adsorção.

Ensaio	Variáveis		Absorvância	Capacidade de adsorção (mg/g)
	Massa do carvão (g)	Concentração de corante (mg/L)		
1	0,20	20	0,24	2,94
2	0,80	20	0	0,74
3	0,20	100	3,17	14,5
4	0,80	100	1,22	3,7
5	0,20	60	1,55	8,74
6	0,80	60	0,01	2,24
7	0,50	20	0,01	1,19
8	0,50	100	2,45	5,84
9	0,50	60	0,7	3,55
10	0,50	60	0,72	3,55
11	0,50	60	0,74	3,55

Fonte: Autor (2023).

4.6.1 Primeira resposta: absorvância

No Quadro 12, são mostradas todas as variáveis e os regressores presentes no modelo amostral do ensaio de adsorção referente à absorvância, obtidos por meio do software Protimiza, que realiza a análise dos dados inseridos e convertendo-os em um modelo de dados completos, além de gerar uma equação de regressão linear.

Quadro 12: Coeficientes de regressão para modelo amostral de definição da absorvância.

Nome	Coeficiente	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	0,75	0,08	9,32	0,0002
X1	-0,62	0,06	-9,73	0,0002
X1 ²	-0,01	0,10	-0,10	0,9255
X2	1,10	0,06	-17,20	0,0000
X2 ²	0,44	0,10	4,47	0,0066
X1 · X2	-0,43	0,08	-5,51	0,0027

Fonte: Autor (2023).

Com isso, obteve-se a seguinte equação de regressão linear, demonstrada pela Equação 5:

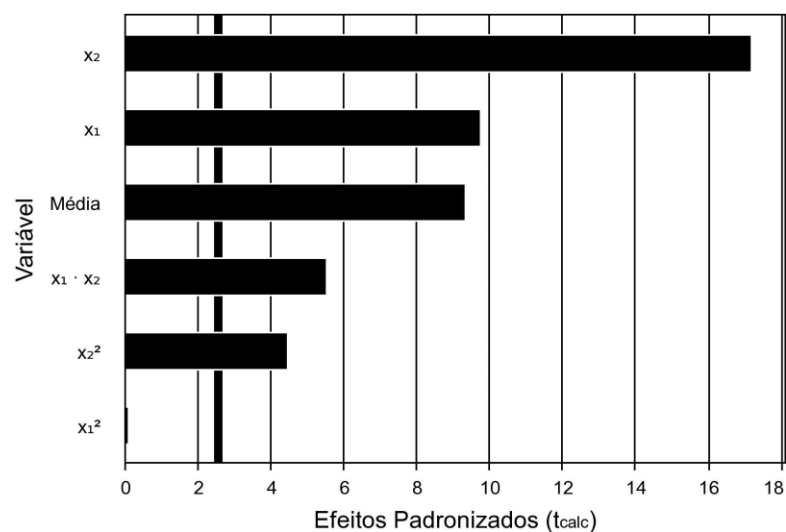
$$Y_1 = 0,75 - 0,62X_1 - 0,01X_1^2 + 1,10X_2 + 0,44X_2^2 - 0,43X_1X_2 \quad \text{(Equação 5)}$$

Em que:

X₁ = Massa do carvão (g);

X₂ = Concentração de corante (mg/L).

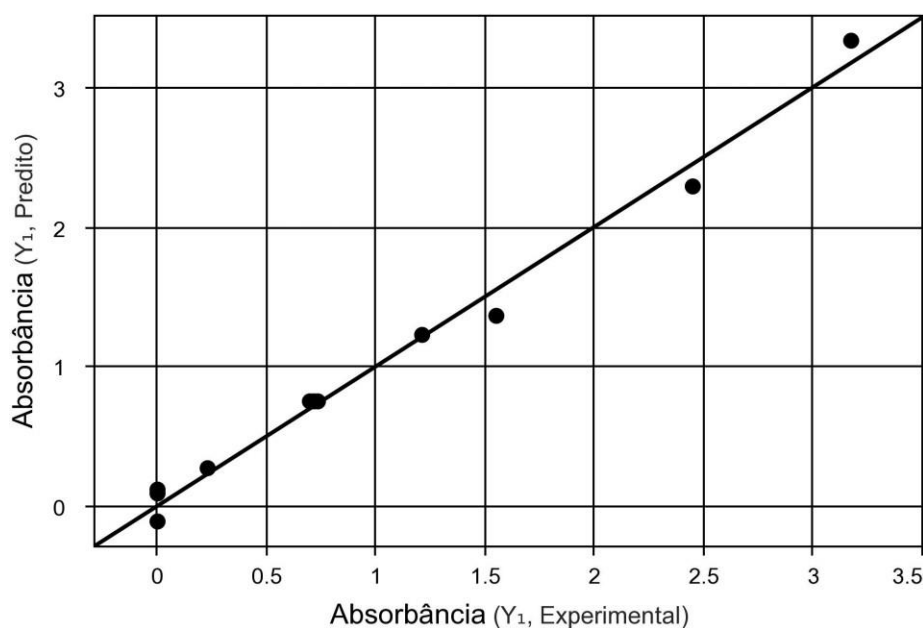
Além da equação, obteve-se também o gráfico de Pareto (Gráfico 1), que mostra o grau de influência de cada variável na absorvância do carvão ativado por meio do t calculado.

Gráfico 1: Influência das variáveis sobre a absorvância.

Fonte: Autor (2023).

Sendo assim, pode-se perceber que a variável X_2 , concentração do corante azul de metileno, se apresenta como a maior influenciadora da absorbância. Conforme pode ser visto no Gráfico 2, o gráfico de predição (aderência), há um comparativo entre os resultados obtidos experimentalmente e os resultados preditos da amostra, mostrando uma pequena diferença entre os valores, não apresentando dados suspeitos.

Gráfico 2: Gráfico de predição de resultados (Estipulado x Obtido).



Fonte: Autor (2023).

O Quadro 13 informa os resultados do teste da análise de variância (ANOVA) para a absorbância do carvão ativado, este quadro tem o intuito de demonstrar se o modelo é estatisticamente significativo.

Quadro 13: Resultado da absorbância das amostras por ANOVA.

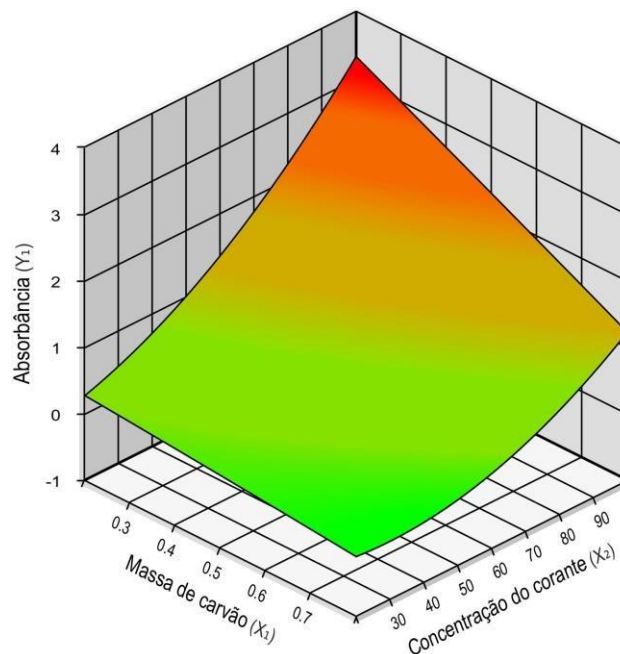
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F_{calc}	p-valor
Regressão	10,8	5,0	2,2	88,5	0,00007
Resíduos	0,1	5,0	0,0	-	-
Falta de ajuste	0,1	3,0	0,0	118,5	0,00838
Erro puro	0,0	2,0	0,0	-	-
Total	10,9	10,0	-	-	-

Fonte: Autor (2023).

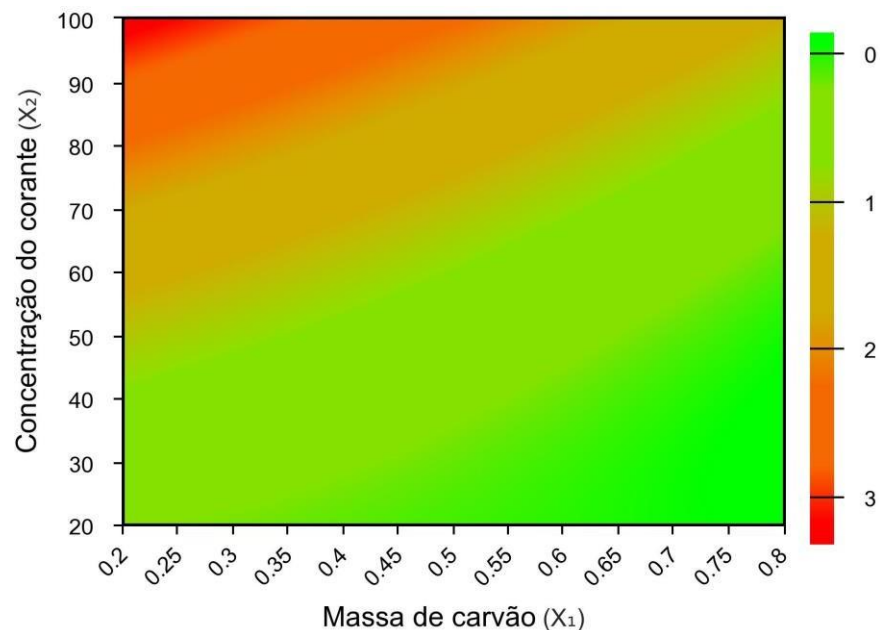
Por meio do teste ANOVA, gerado pelo software Protimiza Experimental Design, obteve-se um resultado de R^2 de 98,88%. Esse valor R^2 , também chamado de coeficiente de determinação, representa a porcentagem da qualidade do ajuste do modelo de regressão, ele indica o quão próximos estão os dados da linha de regressão determinada (DAMÁSIO, 2023).

Nos Gráficos 3 e 4 são apresentados a relação gerada experimentalmente entre massa do carvão, concentração de corante e absorbância.

Gráfico 3: Nível de absorbância em relação a concentração de corante e massa de carvão.



Fonte: Autor (2023).

Gráfico 4: Relação da concentração de corante com a massa de carvão.

Fonte: Autor (2023).

Fazendo uma breve análise dos gráficos vê-se que o nível de absorbância é mais elevado quando a concentração do corante é maior e a massa de carvão menor, logo, vê-se que são duas variáveis inversamente proporcionais para a determinação da absorbância, tendo a massa de carvão um impacto considerável no valor da absorbância.

4.6.2 Segunda resposta: razão de adsorção

No Quadro 14, são mostradas todas as variáveis e os regressores presentes no modelo amostral do ensaio de adsorção referente à razão de adsorção (Q), também chamada de capacidade de adsorção do carvão obtido da pirólise a 600°C.

Quadro 14: Coeficientes de regressão para modelo amostral de definição da razão de adsorção.

Nome	Coeficiente	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	3,55	0,34	10,28	0,0001
X1	-3,25	0,27	-11,84	0,0001
X1²	1,95	0,42	4,62	0,0057
X2	3,19	0,27	11,64	0,0001
X2²	-0,03	0,42	-0,06	0,9525
X1 * X2	-2,15	0,34	-6,40	0,0014

Fonte: Autor (2023).

Com isso, obteve-se a seguinte equação de regressão linear, demonstrada pela Equação 6:

$$Y_3 = 3,55 - 3,25X_1 + 1,95X_1^2 + 3,19X_2 - 0,03X_2^2 - 2,15X_1X_2 \quad \text{(Equação 6)}$$

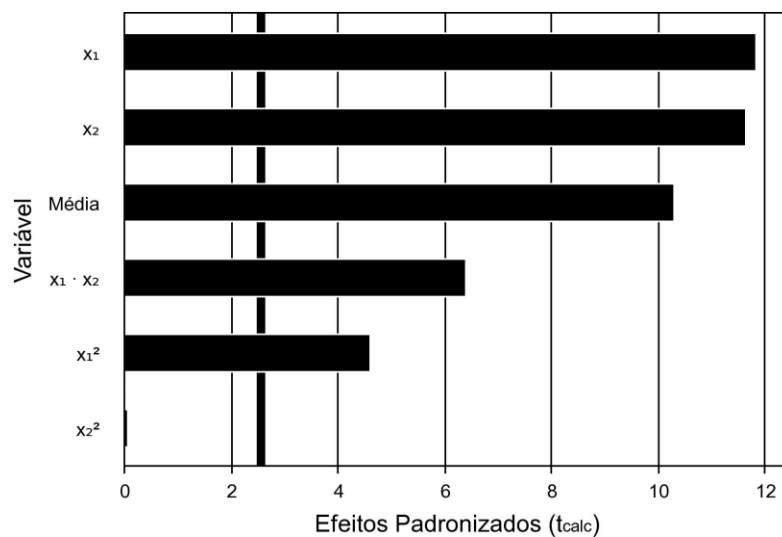
Em que:

X_1 = Massa do carvão (g);

X_2 = Concentração de corante (mg/L).

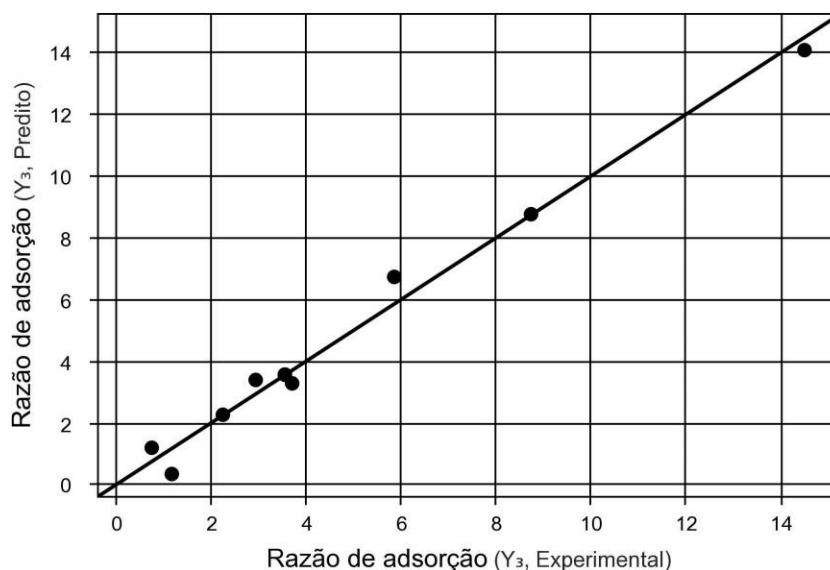
Além da equação, obteve-se novamente o gráfico de Pareto (Gráfico 5) que mostra o grau de influência de cada variável na razão de adsorção do carvão ativado.

Gráfico 5: Influência das variáveis sobre a razão de adsorção.



Fonte: Autor (2023).

A partir da análise do gráfico, percebe-se que a massa de carvão é a variável que mais influencia na capacidade de adsorção, junto com ela a concentração do corante azul de metileno também exerce grande influência. Além disso, tem-se também o gráfico de predição (Gráfico 6), mostrando o comparativo dos resultados obtidos experimentalmente e os resultados estipulados. E a partir da análise do gráfico vê-se que os resultados não se afastam muito da reta de predição, mostrando a confiabilidade do modelo amostral, extinguindo a possibilidade de dados suspeitos.

Gráfico 6: Gráfico de predição de resultados (Estipulado x Obtido).

Fonte: Autor (2023).

O quadro 15 informa os resultados do teste da análise de variância (ANOVA) para a razão da adsorção do carvão ativado, este quadro tem o intuito de demonstrar se o modelo é estatisticamente significativo.

Quadro 15: Resultado da razão de adsorção das amostras por ANOVA.

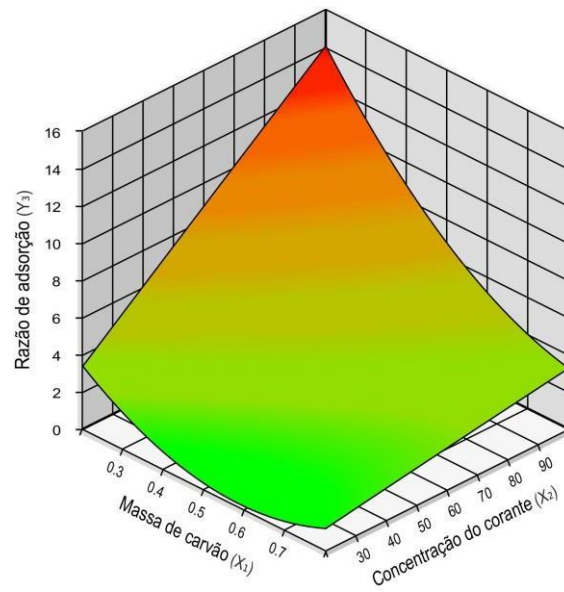
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	153,4	5,0	30,7	67,9	0,00014
Resíduos	2,3	5,0	0,5	-	-
Falta de ajuste	2,3	3,0	0,8	611171,2	0,00000
Erro puro	0,0	2,0	0,0	-	-
Total	155,7	10,0	-	-	-

Fonte: Autor (2023).

Por meio do teste ANOVA, gerado pelo software Protimiza Experimental Design, obteve-se um resultado de R² para a capacidade de adsorção de 98,55%.

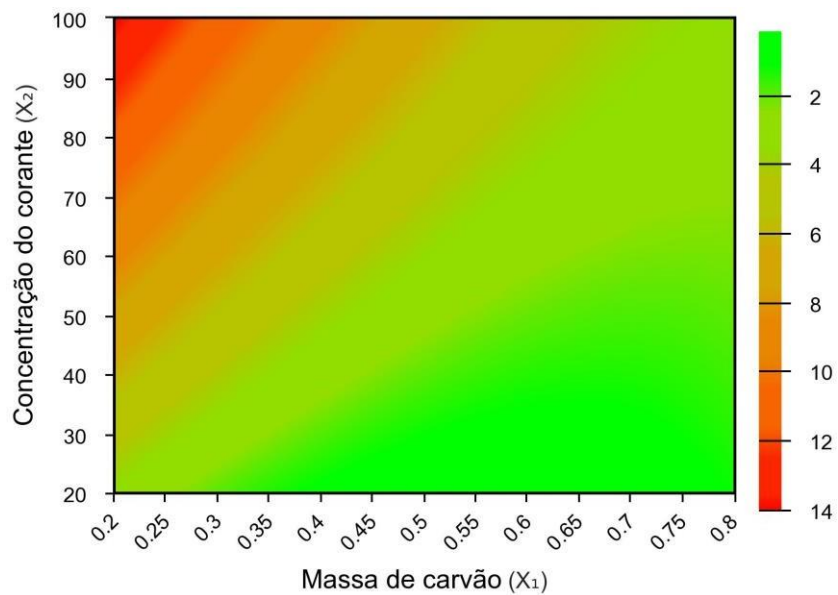
Nos Gráficos 7 e 8 são apresentados a relação gerada experimentalmente entre massa do carvão, concentração de corante e a razão de adsorção.

Gráfico 7: Nível da capacidade de adsorção em relação a concentração de corante e massa de carvão.



Fonte: Autor (2023).

Gráfico 8: Relação da concentração de corante com a massa de carvão.



Fonte: Autor (2023).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise dos resultados percentuais e médias percentuais entre as amostras de biomassa *in natura* testadas e caracterizadas, observa-se que os valores determinados para teor de umidade, material volátil, teor de cinzas e teor de carbono fixo se mostraram dentro da margem encontrada por bibliografias paralelas ao assunto, que continham a respectiva caracterização do material residual a ser pirolisado.

Já para o processo de transformação da biomassa em carvão observou-se que o aumento da temperatura influencia negativamente no rendimento do carvão, cerca de 3% em uma diferença de 50°C, ou seja, uma maior temperatura de degradação térmica gera maior redução do material presente. Além disso o carvão desta biomassa apresentou queda na umidade, com valores relativamente baixos, e aumento no teor de material volátil e cinzas, decorrente das condições da pirólise, e um valor elevado para o teor de carbono fixo.

A respeito do processo de adsorção, ficou claro que o carvão se mostra como uma boa alternativa para ser comercializada e usada para fins comerciais, e que sua capacidade de adsorção é fortemente influenciada pela massa do carvão e pela concentração do corante azul de metileno, sendo o carvão mais adsorvente quando possui uma quantidade menor de massa de carvão e um valor maior de concentração de corante.

Desta forma vê-se que este estudo acerca da capacidade de transformação e uso da biomassa proveniente da casca do pequi como carvão ativado pode corroborar para diferentes bibliografias acerca do assunto, e que este material se apresenta como uma boa e eficiente alternativa para seu uso após degradação térmica, podendo gerar um bom valor agregado ao material. E por esse carvão ser proveniente de uma biomassa muito presente na região do Tocantins, Minas Geral e Goiás, e seu consumo gerar uma elevada quantidade de resíduo, torna-se viável a utilização dessa matéria-prima como fonte de produção de carvão ativado, pois o custo de obtenção do resíduo é bem baixo, e ela se mostra como uma alternativa bastante sustentável para o futuro, podendo reduzir os impactos ambientais provocados pela má destinação final dos resíduos gerados pelo consumo do pequi.

REFERÊNCIAS

- ASTM D 3173-87. **Standard Method for Determination of Moisture Content in Biomass, Society of Testing Materials International.** West Conshohocken. 2003.
- ASTM D 3174-04. **Standard method for ash in the analysis sample of coal and coke.** West Conshohocken, 2004.
- ASTM D 3175-07. **Standard method for volatile matter in the analysis sample of coal.** West Conshohocken, 2007.
- ALMEIDA, M. B. B. de. **Bio-óleo a partir da pirólise rápida, térmica ou catalítica, da palha da cana-de-açúcar e seu co-processamento com gasóleo em craqueamento catalítico.** Dissertação (Mestrado em Ciências em tecnologia de processos químicos e bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 167, 2008.
- ALMEIDA, S. P.; SILVA, J. A. **Pequi e buriti: importância alimentar para a população dos cerrados.** Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1994. 38 p. (Documentos, 54).
- ALVES, A. M.; FERNANDES, D. C.; SOUSA, A. G. O.; NAVES, M. M. V. **Caracterização física e química de frutos do pequi oriundos de três estados brasileiros.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, 2012. (No prelo).
- AQUINO, F. G; AGUIAR, L. M. S. **Conhecendo o Pequi.** Agrosoft, 22 de maio de 2006
- ARAÚJO, A. A. de S.; MERCURI, P. L.; SEIXAS, S. R. S.; STORPITIS, S.; MATOS, J. do R. **Determinação dos teores de umidade e cinzas de amostras comerciais de guaraná utilizando métodos convencionais e análise térmica.** Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas, abr./jun. 2006, vol.42, n. 2.
- BASU, P. **Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory.** Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2018.
- BERTOLINO, J. F., *et al* (2019). **Aplicabilidade do óleo de pequi na cicatrização.** Enciclopédia Biosfera, 16, 229-243.
- BRITO, Mateus Rodrigues. **Avaliação do potencial econômico e social de resíduo do cerrado brasileiro como uso de adsorvente para remoção de poluentes.** Programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente. Universidade Federal do Tocantins (UFT). Palmas-TO. 2021.
- BRANDÃO, A. C. T. *et al.* **Produção de carvão ativado a partir da casca de pequi e sua aplicação no processo de adsorção.** Instituto Federal do Norte de Minas Gerais (IFNMG). Montes Claros. 2017.
- CHAVES, A. M. B., *et al.* **Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de Eucalyptus spp.** Graduação de Engenharia Ambiental. Universidade de Brasília (UNB). Brasília. Brasil. 2013.

CÔRREA, G. C. et al. **Determinações físicas em frutos e sementes de baru (*Dipteryx alata* Vog.), cajuzinho (*Anacardium othonianum* Rizz.) e pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.), visando melhoramento genético.** Bioscience Journal, v.24, n.4, p.42-47, 2008.

DAMÁSIO, B. F.; **Entenda o que é o coeficiente de determinação na regressão linear.** Disponível em: <<https://psicometriaonline.com.br/entenda-o-que-e-o-coeficiente-de-determinacao-na-regressao-linear/>>. Acesso em 24 de setembro de 2023.

FARINHAQUE, R. **Influência da umidade no poder calorífico da madeira de bracatinga (*Mimosa scabrella*, Benth), e aspectos gerais de combustão.** Curitiba: FUEF, 1981. 13 p. (Série técnica, 6).

FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas. **Combustíveis renováveis por meio da pirólise.** Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/quimica/combustiveis-renovaveis-por-meio-pirolise.htm>. Acesso em 18 de maio de 2023.

GUITARRARA, Paloma. **“Biomassa”.** Brasil Escola. Disponível em: <<https://brasilescola.uol.com.br/geografia/biomassa.htm>>. Acesso em 12 de maio de 2023.

INCE, N. H.; APIKYAN, I. G. **Combination of activated carbon adsorption with light-enhanced chemical oxidation via hydrogen peroxide.** Water Research, v. 34, n. 17, p. 4169-4176, 2000.

LADEIRA, B. C.; SANDI, L. U.; PUGET, F. P. **Avaliação da produção de carvão ativado a partir da semente de goiaba utilizando delineamento composto central rotacional.** Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Fortaleza, 2016.

LOPES, C.W.; BERTELLA, F.; PERGHER, S. B. C; FINGER, P. H.; DALLAGO, R. M.; PENHA, F. G. **Síntese e caracterização de carvões ativados derivados do sabugo de milho.** Perspectiva, Erechim, 2013, v.37, n.139, p 27-35.

Minitab Blog. (Data não disponível). **Análise de Regressão: Como interpretar o r-quadrado e avaliar a qualidade de ajuste.** Minitab Blog. Disponível em: <<https://blog.minitab.com/pt/analise-de-regressao-como-interpretar-o-r-quadrado-e-avaliar-a-qualidade-de-ajuste>>. Último acesso em 24 de maio de 2023.

MONTEIRO, Sabrina Sauthier. **Caracterização química da casca de pequi (*caryocar brasiliense* camb.), avaliação de seus extratos e aplicação em linguiça de frango para aumento do shelf life.** Santa Maria, 2013. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia dos Alimentos, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), Santa Maria, 2013. B.

MORENO-CASTILHA, C.; et al. **Carbon.** 2001, 39, 1415.

NEVES, D.; THUNMAN, H.; MATOS, A. TARELHO, L.; GÓMEZ-BAREA, A. **Caracterização e Previsão de Produtos de Pirólise de Biomassa**. Prog. Energy Combust. Sci., 37 (2011), pp. 611-630.

OLIVARES-GÓMEZ, Edgardo. **A Tecnologia de Pirólise no Contexto da Produção Moderna de Biocombustíveis: Uma Visão Perspectiva**. Disponível em: <https://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/artigos_energia/a_tecnologia_de_pirolise_no_contexto_da_producao_moderna_de_biocombustivies_uma_visao_perspectiva.html>. Acesso em: 14 de maio de 2023.

PATIAS, S. G. O. *et al.* **Obtenção de carvão adsorvente oriundo da casca de pequi (Caryocar brasiliense) e sua aplicação no tratamento de efluentes da indústria têxtil através do processo de adsorção**. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Santa Maria. 2015.

PAZ, E. da C. S.; OLIVEIRA, L. R. A. de; PEDROZA, M. M.; PAZ, R. R. de S.; SILVA, E. M. da; SANTOS, M. L. G. dos. **Estudo dos produtos da pirólise e potencial energético da fibra de coco da baía**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado, 2018.

PEREIRA, H. de L.; NASCIMENTO, T. M. do; SILVA, A. L. da. **Aspectos técnicos do processo de pirólise**. CONAPESC. 2022.

PEREIRA, Marcus Vinícius Fialho. **O aproveitamento da casca de banana para a produção de carvão ativado**. Palmas, 2022. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins (IFTO), p. 6, 2022.

PEREZ E. **Diagnose fitoquímica dos frutos de Caryocar brasiliense Camb., Caryocaraceae**. Curitiba: UFPR. p113. dissertação de mestrado. 2004.

RIBEIRO, José Hamilton. **Pequi, o ouro do cerrado**. Revista Globo Rural. Edição 231. Janeiro de 2007. Páginas 42-48.

RIBEIRO, Luiz. **Pequi: Minas, Goiás e Tocantins disputam patrimônio do “ouro do cerrado”**. Estado de Minas. Economia. 2021.

ROCHA, W. D.; LUZ, J. A. M. da; LENA, J. C. de; Romero, O. B. **Esc. Minas 2006**, 59, 409. 2006

SAATH, K. C. de O.; FACHINELLO A. L. **Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil**. Rev. Econ. Sociol. Rural 56. Abril. 2018.

SANTOS, F. S.; SANTOS, R. F.; DIAS, P. P.; ZANÃO JR, L. A.; TOMASSONI, F. **A cultura do pequi (Caryocar brasiliense CAMB)**. Acta Iguazu, v2, n3, p46-57, 2013.

SCHNEIDER, Jaderson Kleveston. **Utilização de biomassas brasileiras para produção de carvão ativado de alta qualidade: caracterização e aplicação como adsorvente**. Porto Alegre, 2018. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2018.

SILVA, J. da. **Estudo da eficiência e aplicabilidade de carvão ativado resultante de pirólise de casca de arroz em barreiras reativas na remoção de contaminantes em solos**. Tese de Doutorado (Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) – UFRS. Porto Alegre, p. 204, 2009.

SILVA, R. V. T. O.; LIMA, V. N.; MESSIAS, A. S. **Uso de biomassa residual como alternativa para a produção de carvão ativado**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUIMICA. 20., 2014, Florianópolis – SC. **Proceedings** [...]. Disponível em: <<https://bit.ly/3raY36Q>>. Acesso em: 13 de maio de 2023.

SILVÉRIO, F. O.; BARBOSA, L. C. A.; PILO-VELOSO, D. A. Pirólise como Técnica Analítica. *Química Nova*, v. 31, p. 1543-1552, 2008.

UDDIN, M. N.; TECHATO, K.; TAWEEKUN, J.; RAHMAN, M. M.; RASUL, M. G.; MAHLIA, T. M. I.; ASHRAFUR, S. M. **An Overview of Recent Developments in Biomass Pyrolysis Technologies**. *Energies* 2018, 11, 3115.

VELMURUGAN, V. **Review of Research and Development on Pyrolysis Process**. *Materials Today: Proceedings*. 2021.

VERA, R.; NAVES, R. V.; NASCIMENTO, J. L. do; et al. **Caracterização física de frutos do pequizeiro (*Caryocar brasiliense* Camb.) no Estado de Goiás**. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v. 35, n. 2, p. 71-79, abr./jun. 2005.

WIGMANS, T. **Carbono: Aspectos industriais da produção e uso de carvões ativados**. Volume 27, p13-22, 1989.

YUSOP, M. F. M. *et al.* **Adsorption of cationic methylene blue dye using microwave-assisted activated carbon derived from acacia wood: Optimization and batch studies**. v. 14, ed. 6, jun. 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878535221001374>>. Acesso em 18 de setembro de 2023.