



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

DANIELMA SILVA MAIA

**APROVEITAMENTO DO CARVÃO ATIVADO OBTIDO DA
CASCA DE CASTANHA DE CAJU NO PROCESSO DE
TRATAMENTO DE ÁGUAS CINZAS**

PALMAS-TO

2021

DANIELMA SILVA MAIA

**APROVEITAMENTO DO CARVÃO ATIVADO OBTIDO DA
CASCA DE CASTANHA DE CAJU NO PROCESSO DE
TRATAMENTO DE ÁGUAS CINZAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Ambiental, como
requisito à obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Ambiental
Orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza

PALMAS-TO

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

M217a Maia, Danielma Silva .

Aproveitamento do carvão ativado obtido da casca de castanha de caju no processo de tratamento de águas cinzas. / Danielma Silva Maia. – Palmas, TO, 2021.

90 f.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado) Profissional em Engenharia Ambiental, 2021.

Orientador: Marcelo Mendes Pedroza

1. Pirólise. 2. águas cinzas. 3. Carvão ativado. 4. Biomassa. I. Título

CDD 628

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

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

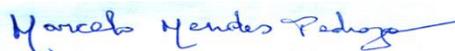
FOLHA DE APROVAÇÃO

DANIELMA SILVA MAIA

APROVEITAMENTO DO CARVÃO ATIVADO OBTIDO DA CASCA DE CASTANHA DE CAJU NO PROCESSO DE TRATAMENTO DE ÁGUAS CINZAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Nível Mestrado Profissional, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental. A presente dissertação foi aprovada pela Banca Examinadora composta pelos membros abaixo relacionados:

BANCA EXAMINADORA



Dr. Marcelo Mendes Pedroza (Presidente da Banca)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins



P/_____
Dr. Sérgio Carlos Bernardo Queiroz (Membro Titular Interno)
Universidade Federal do Tocantins



P/_____
Dr. Germário Marcos Araújo (Membro Titular Externo)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará

Aprovada em: 14 de outubro de 2021

Universidade Federal do Tocantins, Campus Universitário de Palmas

O evento foi realizado por meio de vídeo conferência, conforme Art. 56-A da Resolução nº 13, de 22 de março de 2017, pela necessidade cautelar de distanciamento social em virtude da pandemia causada pelo coronavírus (SARS-CoV-2)

Dedico

*A minha mãe **Brazilina Barros Silva Anjos** e a minha irmã **Daniele Silva Maia**, pelo incentivo e dedicação na minha formação.*

*Ao meu amor, **Diego Paulino Galhardo**, pela paciência e apoio incondicional.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por guiar-me sempre ao melhor caminho, colocando pessoas maravilhosas nesta jornada e que possibilitaram a concretização desta etapa importante na minha vida.

Ao meu orientador **Marcelo Pedroza**, pela oportunidade de realizar este estudo, contribuindo para minha formação com toda a paciência e zelo. Agradeço pelos ensinamentos transmitidos de forma admirável. Obrigada por sua dedicação incessante e sobretudo pelo querido amigo que és, pelo profissional que me inspira e me motiva na minha carreira docente.

Aos **professores** do programa de pós-graduação (mestrado) em Engenharia Ambiental, pelos ensinamentos compartilhados durante o curso. Agradeço aos professores **Dr. Germário Araújo** e **Dr. Sérgio Queiroz** pela contribuição essencial no desenvolvimento e avaliação desta dissertação.

Ao **Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia** pelo apoio e suporte no andamento e conclusão desta pesquisa e principalmente por ceder o Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética do IFTO (LARSEN) para o desenrolar dos ensaios e análises desta pesquisa. Agradeço aos colegas de laboratório cujo esforços e auxílios foram importantes para concretização da pesquisa (**Matheus Gomes Arruda**, **Ranyere Nascimento**, entre outros).

Agradeço ao **colegiado de Engenharia Civil do IFTO-Campus Gurupi** (Mauro Erpen, Kárita Soares, Paulo Roberto, Rodrigo Fortes, Áurea Dayse e Clerson Reis) pelo apoio cedido durante a fase de aulas e pesquisa do mestrado, muitas vezes não poupando esforços de compensação da minha carga horária de trabalho para que eu me dedicasse aos estudos.

Agradeço aos amigos de turma que estiveram comigo nesta jornada. Gratidão as amigas **Nayara Santos** e **Thaís Gonçalves**, a quem considero-as como irmãs, apoiando-me e torcendo por mim. Um obrigado super especial a querida amiga **Camila Rodrigues**, que me ajudou, compartilhou experiências acadêmicas importantes, estando ao meu lado sempre que necessário.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CNH – Análise Elementar de Carbono, Nitrogênio e Hidrogênio

CCC- Casca da Castanha de Caju

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DCCR – Delineamento Composto Central Rotacional

DFC- Delineamento de Faces Centradas

DQO – Demanda Química de Oxigênio

FTIR – Espectroscopia no Infravermelho Com Transformada de Fourier

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IFTO – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

LARSEN – Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética

NBR – Norm Brasileira Registrada

pH – Potencial Hidrogeniônico

SF – Sólidos Fixos

ST – Sólidos Totais

SV – Sólidos Voláteis

TGA – Análise Termogravimétrica

USP – Universidade de São Paulo

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo desenvolver conhecimento técnico sobre a casca de castanha de caju, apresentando e caracterizando o biocarvão desta biomassa, gerado através do processo de pirólise. De modo que, se possa verificar o potencial da utilização do carvão ativado na adsorção de poluentes presentes em águas cinzas. Por meio da análise imediata e elementar foi realizado a caracterização desta biomassa e do carvão ativado obtido através da pirólise da casca de castanha do caju em reator de leito fixo em temperaturas que variam de 400°C a 600°C e taxa de aquecimento de 15°C/min a 25°C/min. O reator de leito fixo é composto por material de aço inox, onde apresenta 100 cm de comprimento e diâmetro externo de 10 cm, é aquecido por forno bipartido reclinável e opera por regime de batelada. O estudo do carvão foi complementado com a análise termogravimétrica (TGA) e análise de espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). O rendimento em massa do carvão variou de 33,10% a 36,10% quando submetido a temperatura de 500°C e taxa de aquecimento a 20°C/min, o que indica um rendimento favorável aos valores definidos para estas variáveis do ponto central no planejamento experimental. Em relação ao comportamento do carvão ativado da casca de castanha de caju no processo de adsorção de contaminantes da água cinza por meio do teste de adsorção de índice de azul de metileno, o experimento mostrou que, com quantidade baixa de massa e alta concentração do corante, a capacidade de adsorção deste, se torna mais eficiente. Além disso, o tratamento da água cinza com a utilização do biocarvão, desenvolveu-se primeiramente com a etapa de decantação, sedimentação e floculação e posteriormente com a etapa de filtração deste efluente utilizando o carvão ativado e areia. O tratamento de águas cinzas nestas etapas, se apresentou apropriado, por remover DQO, sólidos voláteis, ortofosfato solúvel, cloro residual e amônia em percentuais acima de 80% e remoção elevada do parâmetro de turbidez (acima de 90%).

Palavras chaves: pirólise, carvão ativado, biomassa, resíduos agroindústrias, reúso

ABSTRACT

This study aims to develop technical knowledge about cashew nut shell, presenting and characterizing the biochar from this biomass, generated through the pyrolysis process. So that it can be verified the potential of using activated carbon in the adsorption of pollutants present in gray water. Through immediate and elemental analysis, the characterization of this biomass and activated carbon obtained through the pyrolysis of cashew nut shell in a fixed bed reactor at temperatures ranging from 400°C to 600°C and heating rate of 15°C was carried out /min at 25°C/min. The fixed bed reactor is made of stainless steel material, which is 100 cm long and has an external diameter of 10 cm, is heated by a bipartite reclining oven and operates in a batch regime. The study of coal was complemented with thermogravimetric analysis (TGA) and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis. The mass yield of coal ranged from 33.10% to 36.10% when subjected to a temperature of 500°C and heating rate at 20°C/min, which indicates a favorable yield to the values defined for these central point variables in the experimental planning . Regarding the behavior of activated charcoal from cashew nut shells in the adsorption process of contaminants from gray water through the methylene blue index adsorption test, the experiment showed that, with low mass and high concentration dye, its adsorption capacity becomes more efficient. In addition, the treatment of gray water with the use of biochar, was developed first with the step of decantation, sedimentation and flocculation and later with the step of filtering this effluent using activated carbon and sand. The treatment of greywater in these steps was shown to be appropriate, as it removes COD, volatile solids, soluble orthophosphate, residual chlorine and ammonia in percentages above 80% and high removal of the turbidity parameter (above 90%).

Keywords: pyrolysis; activated charcoal; biomass; agribusiness waste, reuse

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1- Produtos derivados do caju	19
Figura 4.2- Estrutura da castanha de cajueiro.....	20
Figura 4.3- Processo de extração e separação da amêndoa nas minis fábricas	22
Figura 4.4- Principais componentes da biomassa lignocelulósica e suas transformações mediante processo de conversão térmica	24
Figura 4.5- Principais produtos obtidos da pirólise com biomassa de diferentes tipos.....	28
Figura 4.6- Esquema de Reator Catalítico de Leito fixo	30
Figura 5.1- Fluxograma das atividades desenvolvidas.....	34
Figura 5.2- Casca de castanha de caju in natura e triturada	35
Figura 5.3- Briquete da casca de castanha de caju	38
Figura 5.4- Representação do Planejamento Experimental (Delineamento Composto Central Rotacional 2 ²	39
Figura 5.5- Biomassa em Reator de Leito Fixo	41
Figura 5.6- Produto Sólido (carvão).....	42
Figura 5.7- Processo de Extração do Bio-óleo e bio-óleo extraído	42
Figura 5.8- Determinação do teor de cinzas do carvão	43
Figura 5.9- Esquema sequenciado de tratamento de águas cinzas	46
Figura 5.10- Jar Test utilizado nos ensaios de coagulação; floculação e decantação.....	47
Figura 5.11- Dosagem de Sulfato de alumínio aplicadas nos recipientes que possuem amostra de água cinza.	48
Figura 6.1- Curva de degradação termogravimétrica da Casca de Castanha de Caju <i>in natura</i>	52
Figura 6.2- Análise de FTIR da Casca de Castanha de Caju.....	54
Figura 6.3- Representação do Diagrama de Pareto	56
Figura 6.4- Valores analisados versus valores pressupostos, para a obtenção de carvão da biomassa CCC.	58
Figura 6.5- Superfície de Resposta para a obtenção de carvão gerado a partir da pirolise da biomassa CCC com variáveis de Temperatura e Taxa de aquecimento	59
Figura 6.6- Análise Termogravimétrica (TGA) do carvão da CCC.....	62
Figura 6.7- Diagrama de Pareto da absorbância do carvão da CCC	64
Figura 6.8- Valores observados X Valores previstos para absorbância do carvão da CCC....	65

Figura 6.9- Superfície de resposta para absorvência do teste de adsorção com utilização do carvão ativado da CCC.....	66
Figura 6.10- Gráfico de Pareto da Capacidade Máxima de Adsorção (Q) do carvão da CCC	67
Figura 6.11- Valores analisados versus os valores pressupostos da capacidade máxima de adsorção do carvão	69
Figura 6.12- Gráfico de superfícies que representa a capacidade máxima de adsorção do carvão desta pesquisa	70
Figura 6.13- Gráfico de Eficiência de Remoção	73

LISTA DE TABELA

Tabela 4.1- Principais países produtores de castanha.....	21
Tabela 4.2- Propriedades de algumas biomassas.....	24
Tabela 4.3- Caracterização da CCC in natura da CCC.....	25
Tabela 4.4- Principais processos de Pirólise.....	28
Tabela 4.5- Critérios de Qualidade para água de reúso.....	32
Tabela 5.1- Fatores e níveis empregados no planejamento experimental (2 ²).....	39
Tabela 5.2- Ordem dos experimentos empregados no planejamento fatorial DCCR 2 ²	39
Tabela 5.3- Fatores e níveis empregados.....	44
Tabela 5.4- Ordem dos experimentos no Planejamento Experimental.....	45
Tabela 5.5- Parâmetros para a caracterização físico-química de águas cinzas e efluente.....	49
Tabela 6.1- Resultados obtidos por meio da Análise Imediata da casca de castanha de caju	51
Tabela 6.2- Análise Elementar da Casca de Castanha de Caju.....	51
Tabela 6.3- Relação de funções químicas identificadas no espectro FTIR da casca de castanha de cajueiro.....	54
Tabela 6.4- Rendimento das frações obtidos do Planejamento Experimental.....	55
Tabela 6.5- Coeficientes de regressão do Planejamento DCCR 2 ² gerado da produção de carvão da casca de castanha de caju em pirólise com intervalo de confiança de 95%... 56	56
Tabela 6.6- ANOVA para a produção de carvão por meio do processo de pirólise de casca de casca de castanha de caju em reator de leito fixo.....	57
Tabela 6.7- Análises Imediatas e Elementares (CNH) das amostras de carvão pirolítico da biomassa CCC.....	60
Tabela 6.8- Resultado da Análise Elementar do carvão obtido por meio do processo de pirolise da CCC.....	60
Tabela 6.9- Resultado do teste de adsorção sob efeito das duas variáveis independentes (massa de carvão e concentração da solução do corante).....	63
Tabela 6.10- Coeficientes de regressão do Planejamento DFC.....	63
Tabela 6.11- ANOVA para absorbância das amostras de carvão ativado na adsorção de azul de metileno.....	64
Tabela 6.12- Coeficientes de regressão do Planejamento DFC para definição da capacidade máxima de adsorção do carvão ativado da CCC.....	67
Tabela 6.13- ANOVA para capacidade máxima de adsorção da absorbância das amostras de carvão ativado na adsorção de azul de metileno.....	68

Tabela 6.14- Características da água cinza bruta.....	71
Tabela 6.15- Resultado do Parâmetro de Turbidez (uT) da água cinza com a dosagem do sulfato de alumínio	71
Tabela 6.16- Dados obtidos do processo de polimento de águas cinzas através do sistema de filtração com emprego do carvão ativado da casca de castanha de caju.	72

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
2.	JUSTIFICATIVA.....	15
3.	OBJETIVOS.....	18
3.1	Objetivo geral.....	18
3.2	Objetivos específicos.....	18
4.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
4.1	Casca de castanha de caju: cadeia produtiva.....	19
4.2	Biomassa.....	23
4.2.1	Definição e Composição.....	23
4.2.2	Propriedades e Características Gerais da Casca de Castanha de Caju.....	25
4.2.3	Processos de Conversão Energética.....	25
4.3	Processo de Pirólise.....	26
4.3.1	Características Gerais.....	27
4.3.2	Tipos de Reatores.....	29
4.3.3	Experiências da pirólise com a casca da castanha de caju.....	30
4.4	Reúso de águas cinzas.....	31
5.	MATERIAL E MÉTODOS.....	34
5.1	Obtenção da amostra.....	34
5.2	Preparo da amostra.....	35
5.3	Métodos de Caracterização Química da Casca de Castanha de Caju.....	35
5.3.1	Análise Imediata.....	35
5.3.2	Umidade.....	35
5.3.3	Determinação do Teor de Cinzas.....	36
5.3.4	Determinação do Teor de Material Volátil.....	36
5.3.5	Determinação do Teor de Carbono Fixo (CF).....	37
5.3.6	Análise Elementar (CNH).....	37
5.3.7	Análise Termogravimétrica (TGA).....	37
5.3.8	Espectroscopia no Infravermelho Com Transformada de Fourier (FTIR).....	37
5.4	Briquetagem da biomassa da casca de castanha de caju.....	37
5.5	Planejamento Experimental.....	38
5.5.1	Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) 2 ²	38
5.6	Pirólise da biomassa em Reator de Leito Fixo.....	40

5.7	Procedimentos analíticos empregados na caracterização química do carvão ativado.....	42
5.7.1	Análise Imediata	42
5.7.2	Determinação do Teor de Cinzas do Carvão	43
5.7.3	Umidade	43
5.7.4	Determinação do Teor de Material Volátil	43
5.7.5	Teor de Carbono Fixo	43
5.7.6	Análise Elementar (CNH)	44
5.7.7	Análise Termogravimétrica (TGA)	44
5.8	Ensaio de Adsorção de Azul de Metileno em CCC.....	44
5.9	Sistema de Tratamento de Águas Cinzas	45
5.9.1	Ensaio de Coagulação; Floculação e Decantação	46
5.9.2	Tratamento do efluente em filtro de areia e carvão obtido da pirólise da casca de castanha de caju	48
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
6.1	Caracterização da Biomassa (Casca de Castanha de Caju)	50
6.1.1	Análise Imediata da Casca de Castanha de Caju	50
6.1.2	Análise Elementar (CNH) da Casca de Castanha de Caju	51
6.1.3	Análise Termogravimétrica (TG) da Casca de Castanha de Caju	52
6.1.4	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada Fourier – FTIR da Casca de Castanha de Caju	53
6.2	Rendimento das frações obtidas na pirólise da Casca de Castanha de Caju.....	55
6.3	Caracterização química dos produtos de pirólise da Casca de Castanha de Caju.....	59
6.3.1	Análise Imediata e Elementar do Carvão (CNH)	59
6.3.2	Análise Termogravimétrica (TGA) do carvão da pirólise da casca de castanha de caju	61
6.4	Teste de adsorção do índice de azul de metileno.....	62
6.4.1	Absorbância do carvão da CCC (Y)	63
6.4.2	Capacidade Máxima de Adsorção (Q)	66
6.5	Teste de adsorção de água cinza em filtro de carvão da Casca de Castanha de Caju	70
6.5.1	Caracterização da água cinza bruta	70
6.5.2	Teste de Coagulação/Floculação com Sulfato de Alumínio	71
6.5.3	Eficiência do carvão ativado da casca de castanha de caju para filtragem de águas cinzas	72
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	75
	REFERÊNCIAS	76

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a estimativa de safra no país em 2019, divulgada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), estimou-se uma produção anual da castanha de caju em uma ordem de 122,6 mil toneladas, no qual, somente o Estado do Ceará, foi responsável por produzir 66,3 mil toneladas (AGÊNCIA IBGE NOTÍCIAS, 2019).

No Nordeste brasileiro desenvolveu-se a cultura do caju, sendo este fruto e seus derivados, uma importante fonte de renda para esta região, gerando empregos tanto no campo como nas indústrias. O Brasil está entre os 10 maiores produtores de castanha de caju no mundo, e de acordo com os dados da Pesquisa Agrícola Municipal – PAM (IBGE, 2018), a área ocupada com cajueiro no Brasil em 2017, foi calculada em 505,5 mil ha; desse total, 99,5% está localizado no Nordeste. As indústrias de beneficiamento da castanha concentram-se em grande parte no Ceará, que possui a maior área plantada com cajueiro no País (61,6% da área nacional e 61,9% da área nordestina) (BRAINER & VIDAL, 2018).

Pela óptica socioeconômica, o fruto e o pedúnculo são os componentes mais importantes obtidos do cajueiro. No processo de beneficiamento do fruto, o principal resíduo de biomassa gerado em quantidades significativas é a casca da castanha de caju, no qual parte desta biomassa é aproveitada nas fábricas beneficiadoras e a outra grande fração é disposta em lixões e aterros sanitários. A casca da castanha de caju é aproveitada como combustível para a queima nos fornos das indústrias de beneficiamento, porém, em sua grande maioria, sem a preocupação com os gases liberados para a atmosfera (TAVARES, 2016).

Em vista disso, o processo de beneficiamento do caju, que parte da agroindústria do fruto, é o motivador de volumosa fração de resíduos agroindustriais, destinando-os de forma inadequada no solo e, seguindo parte para incineração com a finalidade de produção de energia, o que diverge das normas de segurança ambiental por produzir poluentes ao meio ambiente.

A destinação dominante (e insustentável) dos resíduos sólidos para aterros é outra problemática importante: “[...] paga-se para ‘enterrar’ resíduos que, muitas vezes, poderiam ser primeiramente reduzidos, ou então reciclados” (Santos & Gonçalves-Dias, 2012). Neste contexto, o descobrimento de um valor agregado a casca de castanha de caju, é visto hoje, como uma alternativa sustentável para a produção de energias renováveis e a destinação ambientalmente segura deste resíduo, objetivando o propósito de aproveitamento e equacionamento da geração excessiva e a disposição ambientalmente correta. A partir disso, surge o interesse de novas pesquisas e tecnologias para o uso alternativo desta biomassa.

O termo biomassa refere-se a toda matéria orgânica que apresenta forte potencial de utilização para fins energéticos. A casca de castanha de caju é um tipo de biomassa lignocelulósica que pode ser utilizada como fonte de energia e a partir do processo de pirólise podem ser gerados subprodutos nas formas líquida, sólida e a gasosa, como exemplo, o bio-óleo e o biocarvão, obtido neste processo. Para Legner (2012), a utilização do carvão ativado no processo de tratamento de água vem crescendo de forma importante nos últimos tempos.

A água cinza é um tipo de água de reúso proveniente de atividades domésticas, ou seja, é originária de banhos, máquina de lavar roupa, louças, pias de banheiro e lavatórios. Esta, não se confunde com as águas negras, pois não devem conter misturas de fezes e urina. Esse tipo de água, apesar de conter microrganismos, bactérias, ou outros agentes contaminantes, pode ser tratada através de múltiplas etapas, possibilitando formas de reúso diversas, como irrigação de plantas, descarga de vasos sanitários, lavagem de áreas externas, etc. O reúso de águas cinzas tratadas diminui o consumo de água potável para fins menos nobres e contribui para a sustentabilidade hídrica das cidades, minimizando a quantidade de poluentes lançados nos corpos hídricos (BIAZUS, 2015).

Conhecida como etapa prévia, para o tratamento desta água é determinante que se faça a separação do efluente líquido dos materiais sólidos, logo depois, na etapa primária sedimenta-se os sólidos sedimentáveis que podem chegar ao fundo do recipiente pela ação da gravidade ou adição de produtos químicos. O tratamento secundário, realiza a degradação da matéria orgânica, e por fim, o terciário finaliza o tratamento com a remoção de resíduos que tiveram dificuldades de serem degradados nas outras etapas.

A filtração consiste em uma operação física ou mecânica usada para separar sólidos de fluidos através da inserção de um meio filtrante por onde apenas o fluido pode passar (LANDAGE; WASIF; SAPKAL, 2013) apud DALPAZ et al. 2019). Nesta etapa, a areia, a brita e o carvão ativado, ganham destaque, por serem amplamente utilizadas como meio filtrante para tratamento de água. Dentro deste contexto, o carvão ativado de origem do processo de pirólise da biomassa da casca de castanha de caju, vem a ser objeto de estudo deste trabalho, contribuindo para remoção de contaminantes da água cinza.

Tomando como base as proposições aqui discutidas, originou-se a motivação para o desenvolvimento desta pesquisa, buscando dar continuidade a estudos que explorem o aproveitamento dos resíduos agroindustriais, frente a uma grande geração destes resíduos no país, onde há uma destinação em massa aos aterros sanitários e lixões. Mas, qual o potencial do carvão ativado resultante da pirólise da casca de castanha de caju na remoção de poluentes de águas cinzas?

Em vista disso, o presente estudo teve como objetivo desenvolver conhecimento técnico sobre a casca de castanha de caju, apresentando e caracterizando o biocarvão desta biomassa, gerado através do processo de pirólise. De modo que, se possa verificar o potencial da utilização do carvão ativado na adsorção de poluentes presentes em águas cinzas.

2. JUSTIFICATIVA

A origem do cajueiro fundamenta-se em provas circunstanciais que indicam, de forma convincente o Brasil, ou pelo menos, o norte da América do Sul e parte da América Central como o centro de procedência da espécie cultivada (THÉVET, 1978). Esta planta de nome científico *Anacardium occidentale* L. apresenta considerável capacidade adaptativa a solos de baixa fertilidade, a temperaturas elevadas e ao estresse hídrico (SERRANO; PESSOA, 2016), adaptando-se melhor às regiões costeiras do Nordeste brasileiro, onde faz parte da vegetação de praias e dunas, além das formações de restingas, permitindo supor que a origem filogenética da espécie reside em limítrofes da Mata Amazônica ou cerrados com ecossistemas da região Nordeste, com base na maior diversidade e adaptação da planta nestas localidades (MAZZETTO; LOMONACO, 2009).

No período de 2012 a 2016 a cultura do caju, concentrada em grande parte no Nordeste, sofreu longa estiagem. No ano de 2018, houve alta de 110,1% na produtividade nordestina, impulsionada principalmente pelo aumento da produtividade das plantas no Ceará (215,9%), como resultado do processo de substituição de copas em cajueiros gigantes e plantio de novas áreas com cajueiro anão (BRAINER & VIDAL, 2018).

No Estado do Ceará, área que centraliza a maior parte das indústrias de cajucultura do país, baseado no Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Industriais do Estado do Ceará (2004) executado pela Superintendência Estadual do Meio Ambiente (SEMACE), a casca da castanha de caju representou 76,157% dos resíduos da Classe I, que são classificados como resíduos perigosos por conterem substâncias tóxicas (Resolução CONAMA nº 313/02).

A necessidade de se aproveitar resíduos se torna cada vez maior nas indústrias modernas, já que as quantidades de resíduos geradas podem atingir várias toneladas (QUIRINO, 2019). Porém, pode-se agregar valor a esses resíduos, gerando assim interesses econômicos e ambientais, no entanto, necessita-se buscar meios científicos e tecnológicos que possibilitem sua utilização eficiente, econômica e segura (LÓPEZ-MARCOS et al., 2015).

Alguns estudos sobre o reaproveitamento da casca de castanha de caju para fins diversos, e seus possíveis benefícios já vêm sendo realizados, onde resultados positivos foram alcançados em algumas pesquisas, como é o caso de Anjos et al. (2017), Coelho (2014), Moreira (2015), Tavares et al. 2010, entre outros. Os resíduos desta biomassa também podem ser convertidos em outros produtos químicos por meio de rotas bioquímicas para fins diversos. As frações líquida, sólida e gás obtidas por processos termoquímicos podem ser submetidas

posteriormente a outros processos tecnológicos para geração de produtos com maior valor agregado (MOREIRA, 2015).

Neste sentido, a pirólise surge como um método termoquímico alternativo, que visa destinar adequadamente os resíduos agroindustriais com forte potencial poluidor ao meio ambiente, através de um processo de conversão energética da biomassa, gerando subprodutos (carvão, bio-óleo e gases). Dentre as tecnologias disponíveis e adequadas no mercado, o tratamento térmico por pirólise recebe destaque por reduzir o volume do resíduo em até 90%, além de possibilitar o fornecimento de matérias primas em vários segmentos industriais (TORRES FILHO, 2014).

Nessa mesma linha de pensamento, Maschio et al., (1992) consideram a pirólise interessante não apenas como um processo independente para obtenção de produtos com grande potencial energético, mas também como um passo intermediário para a gaseificação ou processos de combustão. Wiggers (2003) cita que a pirólise é uma das muitas alternativas de processos de conversão química de resíduos sólidos que tem recebido uma atenção especial pelas suas vantagens ambientais.

O carvão ativado designado do processo de pirólise, tem como origem uma matéria orgânica, denominada como biomassa. No Brasil, segundo Biscola (2019) os carvões ativados mais empregados são madeira, carvão betuminoso e sub-betuminoso, osso e casca de coco. Esse subproduto apresenta uma grande vantagem em termos de valor econômico, considerando o fato de que esta biomassa se origina muitas das vezes de processos agrícolas industriais que o tratam como resíduo, destinando-o a aterros sanitários. Por este motivo, o seu custo aquisitivo apresenta valor econômico apreciável.

Em concordância com Rodrigues (2019), o carvão obtido do processo de pirólise pode ser empregado como adsorvente na remoção de metais pesados e substâncias orgânicas tóxicas de efluentes, substituindo o carvão ativado comercial. No período de estiagem que ocorre no Estado do Tocantins anualmente (julho a outubro), a empresa responsável pela Estação de Tratamento de Água (ETA), a BRK, faz uso do carvão ativado no processo de remoção de cianobactérias durante a etapa de tratamento do efluente. De acordo com Machado (2019) na Empresa BRK Ambiental, no ano de 2018, foram empregados 3025, 1300, 1550 e 4700 kg de carvão ativado no tratamento de Água da ETA 006 nos meses de julho, agosto, setembro e outubro, respectivamente, com um custo do produto químico de R\$ 3,89/kg.

Efluentes originários de algumas das atividades domésticas, como exemplo, as águas cinzas, estão cada vez mais fazendo parte de projetos de construções sustentáveis que buscam o reúso da água. Submete-se este efluente a um processo de tratamento prévio por meio da

utilização de um conjunto de elementos, incluindo o filtro de carvão ativado, que tem o objetivo de agir como adsorvente de agente contaminante presente neste fluido.

Diversos estudos foram desenvolvidos por pesquisadores que utilizaram tipos distintos de carvão para remoção de diversos microrganismos contaminantes presentes em soluções aquosas e que obtiveram resultados positivos e satisfatórios, como é o caso dos trabalhos de Paschoalato et al., (2008), Marmo et al., (2010), Fernandes et al., (2011), Silva et al., (2012), Leal (2013), Voltan (2014), Guerra (2014), entre outros.

Na adsorção de efluentes por meio do carvão, de acordo com Viana (2013), tem-se um processo de transferência de massa envolvendo um fluido e um sólido, sendo que este último tem a propriedade de reter em sua superfície componentes do fluido. A importância da adsorção está relacionada a sua capacidade de ser eficiente mesmo em soluções muito diluídas, características não presentes em outros processos de separação (VIANA, 2013).

Bezerra & Freitas (2013) empregaram como adsorvente o carvão ativado de origem da casca de castanha de caju, nos ensaios de adsorção das soluções de azul de metileno presentes no efluente industrial. Os resultados mostraram que o subproduto apresenta propriedades adequadas e eficientes para a purificação de água contaminada por corantes orgânicos.

Estudos voltados para descontaminação ambiental são importantes principalmente quando se trata da remediação de águas contaminadas, decorrente das diversas atividades industriais e agrícolas, fato este que, configura um sério problema enfrentado e tem trazido maior preocupação aos pesquisadores e órgãos governamentais.

Desse modo, pensando no aproveitamento deste resíduo agroindustrial e no âmbito das construções sustentáveis onde têm ganhado destaque o reúso de água, a pesquisa é conduzida no sentido da utilização da fração sólida da casca de castanha de caju, obtida pela pirólise, como adsorvente de poluentes presentes em águas cinzas, onde se pretende fortalecer estudos já existentes entorno deste resíduo, além de explicar uma importante alternativa de aproveitamento e agregação de valor a casca de castanha de caju.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial de aproveitamento do carvão ativado da casca de castanha de caju gerado no processo de pirólise em reator de leito fixo, utilizando este subproduto no tratamento de águas cinzas.

3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar a biomassa in natura;
- Efetuar a pirólise da casca de castanha de caju em reator de leito fixo;
- Avaliar e caracterizar a fase sólida (carvão) produzida na reação de pirólise da casca de castanha de caju no reator de pirólise de leito fixo;
- Utilizar o carvão da castanha de caju para a remoção de poluentes dissolvidos de águas cinzas, em coluna de filtração.

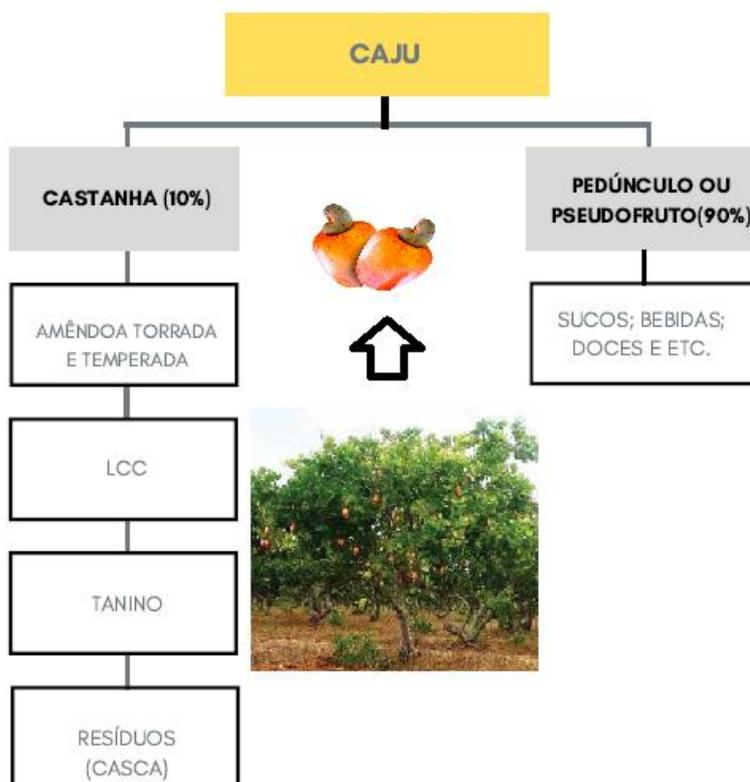
4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Casca de castanha de caju: cadeia produtiva

Anacardium occidentale L., *Anacardiaceae*, conhecida como cajueiro, é uma planta nativa do Brasil, característica das regiões costeiras do Norte e Nordeste. É uma planta nativa do Brasil, que é composta pela castanha de caju (verdadeiro fruto) e o caju (pseudofruto), que apresenta excelentes propriedades nutricionais e sensoriais (VASCONCELOS et al., 2015). A planta está disseminada em países como Índia, Moçambique, Tanzânia, Quênia, Vietnã, Indonésia e Tailândia (Mazzetto et al., 2009). No Brasil, o cultivo do caju é encontrado em sua maioria na região Norte e Nordeste, onde representa uma parte considerável da economia local, gerando fonte de renda e trabalho nestas áreas.

Do cajueiro praticamente tudo se é aproveitado, o seu cultivo apresenta um alto potencial, agregando valores significativos advindo de seus subprodutos, conforme mostra a Figura 4.1.

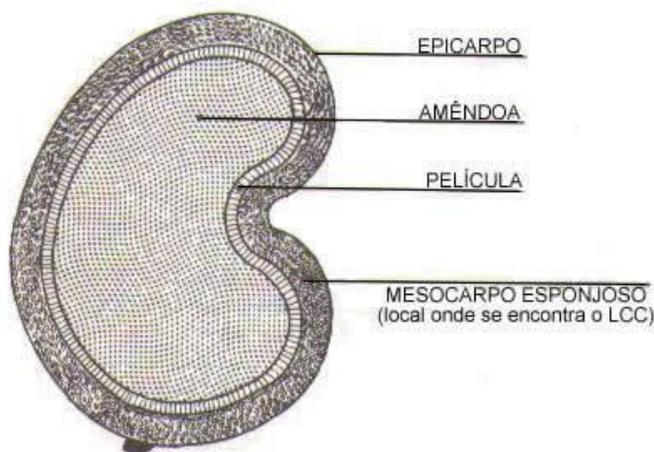
Figura 4.1- Produtos derivados do caju



Fonte: AUTORA (2020)

O fruto do cajueiro, conhecido como castanha de caju, é um aquênio de casca coriácea lisa, mesocarpo alveolado, contendo um líquido escuro, cáustico e inflamável, chamado de líquido da casca da castanha do caju (LCC) (MOREIRA, 2015). Na parte mais interna está localizada a amêndoa da castanha de caju (ACC), constituída de dois cotilédones carnosos e oleosos que compõem a parte comestível do fruto e que é muito apreciada no Brasil e no mundo (MAZZETTO et al., 2009). A Figura 4.2 ilustra a estrutura da castanha de caju.

Figura 4.2- Estrutura da castanha de cajueiro



Fonte: <http://www.mecol.com.br/portugues/informacajuebrasil.htm>

A castanha é composta pelo pericarpo e pela amêndoa (QUIRINO, 2019). O principal destino econômico da cultura é a produção de castanhas, ficando pseudofruto em segundo lugar na pauta da comercialização, mesmo apresentando um sabor agradável e de alta composição nutricional (RAMOS et al., 2011).

De acordo com Oliveira (2008), no Brasil as beneficiadoras de castanha de caju que se encontravam nos estados do Ceará, Piauí, Rio Grande do Norte e Bahia, participavam com 95% da produção nacional com uma área plantada superior a 650.000 hectares e a produção de castanha de caju destinada à exportação gerava 150 milhões de dólares anuais (OLIVEIRA, 2008). Em 2019, segundo dados da CONAB (2019), o estado do Ceará permaneceu no topo do ranking como um dos maiores produtores de castanha no Brasil com uma produção estimada de 66,3 mil toneladas, seguido dos estados do Piauí e Rio Grande do Norte.

Conforme as informações da Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO divulgadas pela CONAB (2019), a evolução da produção mundial de castanha de caju com casca, entre 2013 e 2017, ordenado pela produção nos principais países onde o

produto é cultivado, aumentou a uma taxa média anual de 1,1% aa, situando-se, em 2017, em 3,9 milhões de toneladas.

Ainda sobre estes dados, em relação aos países produtores que são também consumidores da castanha de caju, alguns se destacam neste ranking como o Vietnã, Índia e Costa do Marfim. O Brasil situou-se como nono principal país produtor em 2017, produzindo 133,6 mil t de castanha de caju com casca no período, como mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1- Principais países produtores de castanha

	País	Ano 2017
1.	Vietnã	863060
2.	Índia	745000
3.	Costa do Marfim	711000
4.	Filipinas	222541
5.	Tanzania	164245
6.	Guiné Bissau	155953
7.	Benim	151836
8.	Moçambique	139000
9.	Brasil	133608

Fonte: adaptado pela autora de IBGE e FAO

De acordo com os dados atualizados do IBGE (2019), a estimativa da safra de castanha de caju no Brasil foi de aproximadamente 120,4 mil toneladas, com alta de 5,2% em relação a março deste ano. Em relação a 2018, a produção de castanha de caju caiu 14,8%. A área plantada (439,0 mil hectares) reduziu 4,6% e o rendimento médio (280 kg/ha) caiu 12,8%.

No processo de beneficiamento feito nas indústrias praticamente tudo se é aproveitado do cajueiro, onde, o principal resíduo gerado é a casca de castanha de caju que se enquadra como resíduo agrícola. O processo a extração da CCC é feito após a queima desta, no qual ocorre a separação da amêndoa que tem grande valor comercial, da casca, que detêm grande potencial combustível, e ainda é gerado a parte líquida que encharca a casca comumente conhecido como LCC, líquido da casca de castanha de caju. Por fim, a casca é separada após esse beneficiamento térmico e se torna fria e quebradiça. A Figura 4.3 apresenta o processo de separação da amêndoa.

Figura 4.3- Processo de extração e separação da amêndoa nas minis fábricas



Fonte: <http://fidamercosur.org/claeh/experiencias/experiencias-en-la-regi%C3%B3n/979-castanha-de-caju-ouro-de-serra-do-mel-no-sert%C3%A3o-brasileiro>

Nas minis fábricas, a extração da CCC e a separação da amêndoa acontece de forma mais artesanal, onde a mão de obra é intensificada pelo corte manual. De acordo com o BNB (2009), nas grandes indústrias existe o auxílio de etapas mecanizadas para o corte da castanha, aumentando o rendimento do produto (amêndoa) e subprodutos (casca).

A extração do óleo a partir das amêndoas quebradas representa uma agregação de valor à cadeia do caju, pois o óleo, por apresentar qualidade sensorial diferenciada e alto valor nutricional, pode ser vendido como produto final, com maior valor agregado (LIMA, PINTO & MAGALHÃES, 2018).

O bagaço da fruta é um resíduo que compõe cerca 20-25% do peso total da fruta fresca e é tratado como um lixo industrial, que pouco tem valor econômico e geralmente é utilizado como adubo (QUIRINO, 2019).

As grandes indústrias aproveitam a casca de castanha de caju como combustível para as caldeiras, o IBAMA é responsável por fiscalizar estas unidades industriais que a utilizam como combustível, exigindo-se a instalação de filtros para evitar a poluição ambiental gerados pelos gases emitidos durante a combustão (LEITE, 1994). As indústrias que não fazem este reaproveitamento, geralmente as minis fábricas, onde não há necessidade de caldeiras, destinam as CCC's aos aterros sanitários. Com isso as cascas geradas do processamento das minis fábricas não seguem uma rotina de coleta adequada, e são na sua maioria, despejadas no

solo, implicando num grande aumento na geração de resíduos sólidos descartáveis (IRIAS et al., 2004).

4.2 Biomassa

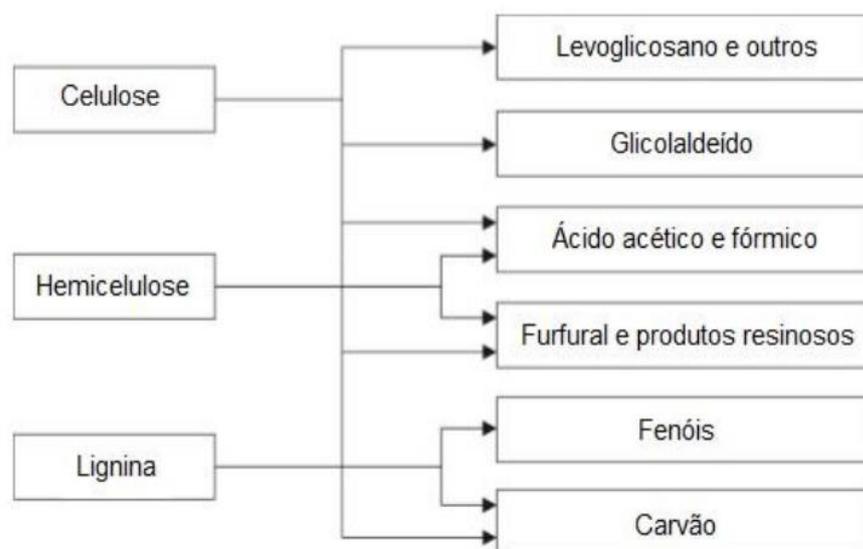
4.2.1 Definição e Composição

Biomassa pode ser geralmente definida como toda matéria orgânica que consiste principalmente de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio (TSAMBA et al., 2006), incluindo madeira e seus resíduos derivados, diferentes resíduos orgânicos (resíduos sólidos urbanos biodegradáveis), agrícolas e de colheita e dejetos animais, entre outros.

A composição da biomassa apresenta principalmente celulose, hemicelulose e lignina. Hemiceluloses são polissacarídeos de parede celular presentes nas células vegetais e mais suscetíveis à hidrólise quando comparados à celulose, uma vez que apresentam menor grau de polimerização (BRAGA, 2018). A lignina é, uma macromolécula orgânica com diversos grupos funcionais, cuja função é conferir rigidez, impermeabilidade e resistência a ataques microbiológicos aos tecidos vegetais (OLIVEIRA et al., 2017). A quantidade de lignina em base seca em madeiras varia geralmente de 20 a 40% em peso, e em espécies herbáceas como o bagaço, sabugo de milho, cascas de amendoim, palha e cascas de arroz varia de 10 a 40% em peso (KLASS, 1998 apud YAMAN, 2004).

Os componentes da biomassa, quando submetidos a diferentes temperaturas geram um produto intermediário para fins energéticos que podem ser direcionados a vários tipos de processos de conversão. Existem três processos frequentemente utilizados para extrair energia a partir de biomassa, estes são: de combustão (exotérmica), de gaseificação (exotérmica) e de pirólise (endotérmico) (FRASSOLDATI et al., 2006). A Figura 4.4 mostra os principais componentes da biomassa e suas alterações sofridas com o processo de pirólise.

Figura 4.4- Principais componentes da biomassa lignocelulósica e suas transformações mediante processo de conversão térmica



Fonte: (MOREIRA, 2015)

O enxofre também é encontrado em menor proporção na composição de algumas biomassas. Além dele, geralmente uma quantidade pequena de parte inorgânica também é composta. A concentração das cinzas gerada por estes inorgânicos varia de menos de 1% em madeira a cerca de 15% em biomassa herbáceas e resíduos agropastoris (YAMAN, 2004). Tsai et al., (2006), através de um estudo elaborado, pesquisou as principais propriedades de algumas biomassas como mostra a Tabela 4.2.

Tabela 4.2- Propriedades de algumas biomassas

Características	Palha de Arroz	Bagaco de Cana-de-Açúcar	Casca de Coco
Análise Imediata (wt. %)			
Umidade	13,61	16,07	11,26
Voláteis	76,85	79,59	85,36
Cinzas	9,54	4,43	3,38
Análise Elementar (wt. %)			
Carbono	50,93	58,14	63,45
Hidrogênio	6,04	6,05	6,73
Nitrogênio	0,83	0,69	0,43
Enxofre	0,23	0,19	0,17
Cloro	0,36	0,36	0,95
Oxigênio	41,61	34,57	28,27
Poder Calorífico Superior (MJ/kg)	16,35	18,61	22,83

Fonte: adaptado pelo autor de TSAI et al., (2006)

4.2.2 Propriedades e Características Gerais da Casca de Castanha de Caju

A CCC, biomassa lignocelulósica, apresenta um grande potencial como fonte renovável para a geração de energia, por seu poder calorífico apresentar excelentes valores e por apresentar 60% da massa da noz de caju (FIGUEIREDO, 2009). Comparativamente, o poder calorífico deste resíduo é equivalente ao de outros produtos utilizados para o mesmo fim, como casca da semente de algodão, casca de amendoim, serragem e outros (SILVA et al., 2005 apud LIMA, 2008).

Figueiredo (2011) em seu estudo, caracterizou as propriedades da biomassa da casca de castanha caju, no qual os resultados são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3- Caracterização da CCC in natura da CCC

Características	Biomassa (Casca de Castanha de Caju)
Umidade (%)	8.7
Carbono (%)	52.9
Hidrogênio (%)	6.9
Nitrogênio (%)	0.8
Oxigênio (%)	39.4
Materiais Voláteis (%)	79.6
Cinzas (%)	1.4
Poder Calorífico Superior (MJ kg ⁻¹)	22.5

Fonte: adaptado pelo autor a de FIGUEIREDO (2011)

Os estudos já existentes que dizem respeito ao reaproveitamento da biomassa da casca de castanha de caju, em sua maioria, estão voltados para sua utilização como fonte energética. No entanto, para este emprego, a biomassa deverá ser modificada por processos físicos, termoquímicos e/ou biológicos. A densificação, combustão e gaseificação são tipos de processos físicos, já os termoquímicos envolvem a pirólise e a liquefação, e o último, os biológicos englobam a fermentação e a digestão anaeróbia.

4.2.3 Processos de Conversão Energética

O processo físico de *densificação* para biomassas *in natura*, de acordo com Rodrigues (2019) consiste na realização da briquetagem em altas pressões e aumento da temperatura (em torno de 100 °C), assim, a lignina atua como ligante, no qual as partículas necessitam

apresentar em geral de 5 a 10 mm e a umidade de 8 a 15%, todo esse processo gera um alto custo, devido ao elevado consumo de energia elétrica. Segundo Morais et al., (2006), para biomassas carbonizadas pode-se produzir briquetes com baixa pressão, já que a elasticidade da fibra foi degradada, assim possui baixo custo.

Segundo Marques (2015), a *combustão* pode ser dividida em quatro etapas: a primeira, ocorre a secagem a uma temperatura de 100 a 150 °C; na segunda, é realizada a pirólise a uma temperatura que varia de 150 a 200 °C, onde ocorre a degradação do combustível, produzindo gases e alcatrão; a terceira, ocorre a gaseificação a uma temperatura de 500 a 700 °C, quando degrada os constituintes do combustível originando monóxido de carbono; e a quarta, a combustão, onde ocorre a oxidação completa do combustível.

A *gaseificação* é a conversão da biomassa em estado gasoso através de um gaseificador submetido a uma quantidade ponderada de ar. Neste gás, que contém principalmente hidrogênio e monóxido de carbono, a conversão é realizada em três etapas: na primeira etapa ocorre a secagem da biomassa; na segunda etapa é realizada a pirólise em temperatura de 300 a 500°C sem agente oxidante, originando carvão vegetal, hidrocarbonetos e gases; na terceira etapa o produto da pirólise é oxidado, produzindo dióxido de carbono, hidrogênio e resíduos de hidrocarbonetos (RODRIGUES, 2019).

A *pirólise* é um processo termoquímico decomposição térmica da matéria orgânica na ausência total de ar ou de oxigênio. Para Singh et al., (2016) a pirólise consiste na transformação de uma biomassa sólida, na ausência de agentes oxidantes, em gases (H₂, CO₂, CH₄, hidrocarbonetos), líquido (hidrocarbonetos poliaromáticos, compostos aromáticos oxigenados e água) ou *char*/carvão.

A *liquefação* consiste na conversão de biomassa triturada, com um catalisador e hidrogênio em altas temperaturas que variam de 300 a 350 °C a altas pressões (150 a 250 atm), este processo produz um combustível líquido, viscoso que pode ser utilizado em fornos. (DEMIRBAS, 2000 apud SILVA, 2013).

No processo de *digestão anaeróbia* que ocorre na ausência de oxigênio, a decomposição da biomassa se dá pela ação de micro-organismos acidogênicos e metanogênicos que degradam a matéria orgânica, produzindo metano e gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia (CHERNICHARO, 1997 apud PEDROZA, 2011).

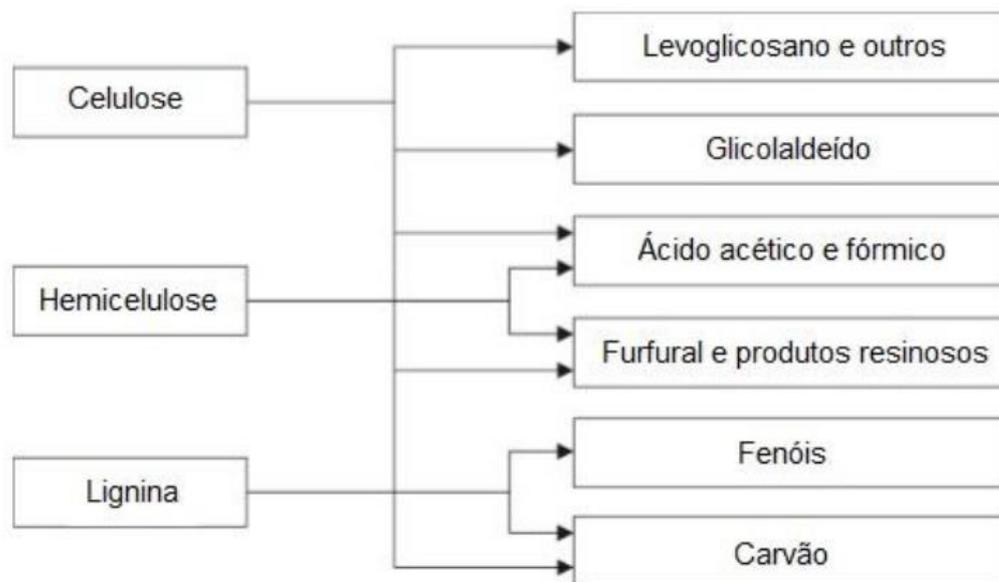
4.3 Processo de Pirólise

4.3.1 Características Gerais

Existe a pirólise rápida e a convencional, a primeira é considerada avançada, pois é possível obter bio-óleo, já a convencional produz especificadamente carvão (VIEIRA, 2000 apud PEDROZA, 2011). Ambas dão origem a subprodutos nas formas de gás, líquido e resíduos sólidos ricos em carbono. São etapas da reação de pirólise, a gaseificação e a combustão e ainda uma série de reações químicas e de processos de transferência de massa e de calor.

Dentre os processos termoquímicos de conversão da biomassa em energia, a pirólise é um dos mais promissores. Tecnologias e estudos em larga escala estão sendo realizados em relação a este processo com o intuito de destinar os resíduos de biomassa para a geração de produtos com alto potencial energético. Logo, o processo de pirólise vem a agregar, sendo uma importante alternativa que visa a possibilidade de geração de um produto sólido, líquido e gasoso, que podem ser destinados a outras áreas de aplicação.

Durante o processo de pirólise as temperaturas de reação variam de 400 a 800°C, os resíduos de biomassa são convertidos em grandes números de compostos químicos que podem ser utilizados como insumos para a indústria química ou servir como substitutos para derivados de petróleo. Os processos termoquímicos baseiam-se na conversão de biomassa em uma fração volátil que consiste em gases, vapores e componentes do alcatrão, um resíduo sólido rico em carbono (carvão) e em uma fração líquida denominada bio-óleo (DEMIRBAS, 2002). A Figura 4.5 mostra o esquema dos produtos obtidos da pirólise.

Figura 4.5- Principais produtos obtidos da pirólise com biomassa de diferentes tipos

Fonte: (BRIDGWATER; MEIER; RADLEIN, 1999)

O processo ainda compreende quatro etapas distintas bem características: primeiramente a secagem do material, segunda etapa da decomposição da hemicelulose, seguido da decomposição da celulose e pôr fim a decomposição da lignina (YANG et al., 2007). Além disso, parâmetros químicos e físicos podem influenciar este processo termoquímico, tais como: pré-tratamento da biomassa, tamanho das partículas (granulometria), taxa de aquecimento, tipo de reator, tempo de residência, pressão atmosférica e temperatura de pirólise (PUTUN, 2007 apud KIMURA, 2009).

Em função das condições em que este processo é conduzido, e de acordo com as variáveis citadas, a pirólise é classificada em carbonização quando ocorre de forma muito lenta, em pirólise convencional com período apenas lento, e rápida e flash pirólise quando esta duração é curta. A Tabela 4.4 aponta os principais processos de pirólise utilizados para biomassa lignocelulósica.

Tabela 4.4- Principais processos de Pirólise

Processo de pirólise	Tempo de Residência	Taxa de aquecimento	Temperatura °C	Produtos obtidos
Carbonização	Dias	muito baixa	400 a 450	Carvão vegetal
Lenta	5 a 30 min	baixa	Até 600	bio-óleo, carvão e gás
Rápida	0,5 a 5 s	muito alta	550 a 650	bio-óleo
Flash-liquida	menos de 1 s	alta	inferior a 650	bio-óleo
Flash-gás	menos de 1 s	alta	superior a 650	produtos químicos e gás combustível

Fonte: MOREIRA (2015)

O carvão, alcatrão (líquido pirolítico, bio-óleo) e gases combustíveis, produtos obtidos da pirólise possuem rendimento e composição diretamente ligados aos parâmetros especificados anteriormente. Os usos dos produtos gerados são direcionados a áreas de aplicação distintas e conforme os estudos avançam entorno das biomassas e a conversão termoquímica destas, maiores possibilidades vão ampliando o seu campo de aplicação.

Para utilização do bio-óleo é necessária sua caracterização química e a partir destes resultados obtidos é possível avaliar sua utilidade. Atualmente as experiências tidas com a sua utilização, são como combustível para aquecimento e geração de energia. O carvão pode ser utilizado no processamento do minério de ferro, no refino de açúcar, como absorvente, como adubo, como matéria-prima para gaseificar e produzir gases de síntese com baixo conteúdo de alcatrão (PELAEZ-SAMANIEGO et al., 2006). Os gases podem ser usados para secagem de biomassa, aquecimento ou geração de energia mediante turbinas a gás (BRIDGWATER, 2001).

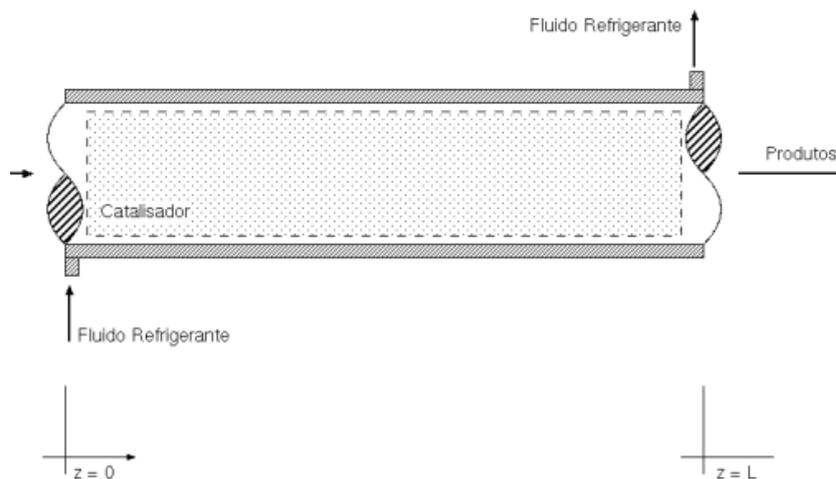
4.3.2 Tipos de Reatores

Os reatores são os equipamentos empregados para realização dos procedimentos termoquímicos, ou seja, a pirólise. Estes se apresentam em dois tipos, reator de leito fluidizado e reator de leito fixo, ambos com características específicas, onde a escolha do tipo de reator obedece às características do tipo de material a ser processado.

Para Lv et al., (2004) os *reatores de leito fluidizado* são usualmente aplicados para a pirólise rápida, uma vez que, proporciona uma rápida transferência de calor, um bom controle da reação de pirólise e do tempo de residência do vapor, alta área de contato superficial entre o fluido e o sólido, por unidade de volume, bom transporte térmico no interior do sistema e alta velocidade relativa entre o líquido e a fase sólida. Um leito fluidizado é constituído por sólidos mantidos em semissuspensão, em estado de fluidização, pela passagem de um fluido com velocidade adequada através do leito de partículas (MIRANDA, 2014).

Os *reatores de leito fixo* apresentam uma estrutura formada por um tubo cilíndrico ocupado por catalisadores inamovíveis que interagem com os reagentes e fluem pelo leito catalítico sendo convertidos em produtos. Estes, possuem vantagens como: unidades de elevada capacidade com construção simplificada; reatores de fácil operação e manutenção; diversas pesquisas no projeto e desenvolvimento desses equipamentos (HILL, 1977). A Figura 4.6 mostra a representação gráfica de um reator de leito fixo.

Figura 4.6- Esquema de Reator Catalítico de Leito fixo



Fonte: MORAIS (2004)

4.3.3 Experiências da pirólise com a casca da castanha de caju

Alguns pesquisadores já desenvolvem estudos que tratam do processo de pirólise com a utilização da casca da castanha de caju como biomassa. A resultante desse processo implica na geração de subprodutos, onde seus compostos químicos gerados podem ser aproveitados.

Das e Ganesh (2003) descreveram a distribuição dos produtos (líquido, gás e carvão) da casca de castanha de caju (CCC) usando um reator de pirólise a vácuo e mostraram que a proporção de bio-óleo nos produtos de pirólise, manteve-se praticamente constante na faixa entre 400°C e 550°C e o rendimento máximo de bio-óleo foi obtido a 500°C. O poder calorífico do bio-óleo obtido foi de 40 MJ.kg⁻¹, o qual este valor é semelhante aos combustíveis provenientes do petróleo.

Kiruthika et al., (2013) estudaram a produção de bio-óleo a partir da pirólise de vários resíduos agrícolas, incluindo a CCC, utilizando um pirolisador em escala laboratorial. Neste equipamento foi utilizado de 10-15g de biomassa a diferentes temperaturas entre 450°C e 550°C. Verificou-se que a produção de bio-óleo aumenta com o aumento da temperatura até 550°C e a produção de carvão diminui com o aumento da temperatura.

Patel et al., (2011) estudaram a pirólise da CCC em um reator de leito a 500°C e sob vácuo de 720 mmHg. O bio-óleo obtido foi extraído com fluido supercrítico (CO₂) e analisador por cromatografia a gás acoplada a espectrometria de massas (CG-MS) e por espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) mostrando a presença de altas

concentrações de cardanol e fenóis, sendo considerado um bom material para fabricação de resinas.

Melzer et al., (2013) estudou a pirólise rápida de resíduos agroindustriais, entre eles a CCC. As biomassas foram submetidas a um reator tubular 27 previamente aquecido a 500°C sob um fluxo de nitrogênio de 0,666 L min⁻¹. A fração líquida foi obtida no tempo de 12 minutos, enquanto que a fração gás foi recolhida em 15 minutos de processo. Dentre as biomassas estudadas a CCC apresentou ser uma biomassa lignocelulósica rica em extrativos, revelando a influência destes sobre o comportamento de decomposição e de conversão da biomassa. A pirólise pode revelar também a influência do alto teor de extrativos na biomassa inicial em relação ao rendimento dos produtos desta, no qual, o rendimento do produto líquido foi maior, enquanto que o biocarvão e o gás apresentaram menor rendimento.

Por ter alto poder calorífico, o carvão, resultante do processo de pirólise, pode ser utilizado como combustível ou pode ser reaproveitado como insumo para a preparação do carvão ativado. Já a fração líquida, resultante deste processo, apresenta uma complexa mistura de hidrocarbonetos. Por este motivo, pode ser utilizada como combustível, ser adicionado ao insumo de refinarias de petróleo melhorado por catalisadores a fim de produzir combustíveis refinados de grau elevado, ou ainda poderá ser potencialmente usado como produto químico. Dentre os subprodutos da pirólise, o alcatrão geralmente tem preferência devido ao seu poder calorífico, sua facilidade de transporte e armazenagem, seu baixo conteúdo de nitrogênio e enxofre e pela alternativa de serem convertidos em produto químico. (APAYDIN-VAROL; PÜTUN; PÜTUN, 2007).

4.4 Reúso de águas cinzas

Do ponto de vista ambiental, a água de reúso é uma alternativa adequada para a redução nas vazões de lançamento de efluentes, além de contribuir para diminuição da captação de água nos mananciais. Em alguns países o reúso de água já é uma prática habitual, existindo diversos padrões deste sistema adotados nestes locais. Entretanto, aqui no Brasil, estas práticas ainda são preliminares.

É importante que se leve em consideração aspectos legais, institucionais e estruturais para sua prática, o tipo de reúso que se deseja e também o nível de tratamento aplicado ao efluente, para que este atinja o nível esperado. O reúso, operacionalmente, permite substituir grandes volumes de água destinados a usos nos quais a potabilidade não é fator preponderante (JEFFERSON et al.,1999).

Lavrador Filho (1987) propõe a seguinte terminologia para diversas formas de reúso:

- **Reúso indireto não planejado da água:** é aquele em que a água utilizada em alguma atividade humana é descarregada no meio ambiente e novamente utilizada à jusante em sua forma diluída de maneira não intencional e não controlada.
- **Reúso indireto planejado da água:** ocorre quando os efluentes depois de tratados são descarregados de forma planejada para serem reutilizados a jusante.
- **Reúso direto planejado da água:** ocorre quando os efluentes após convenientemente tratados são encaminhados diretamente do seu ponto de descarga até o local do reúso, sofrendo em seu percurso os tratamentos necessários, mas não sendo descarregados no meio. Ex.: irrigação, recarga de aquíferos, usos industriais e até mesmo passar por tratamento para se adequar ao padrão de potabilidade servindo como água de abastecimento

Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2016) as águas cinzas são aquelas que já foram utilizadas em banheiro, máquina de lavar, tanques, banho e lavatório de banheiro, não incluindo efluentes de pia de cozinha e bacia sanitária. Reúso de água cinza significa, por exemplo, em uma residência, fazer com que água servida de lavatórios, chuveiros, máquinas de lavar louça e roupa e da cozinha seja direcionada para sofrer um tratamento adequado e uma redistribuição para descargas, rega de jardins, lavagem de piso e tantas outras atividades que podem ser feitas sem necessitar de água potável (FIORI et al., 2006).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) por meio da NBR 13969/1997 determina alguns critérios de qualidade da água para reúso de acordo com seus usos pretendidos, conforme a Tabela 4.5.

Tabela 4.5- Critérios de Qualidade para água de reúso

Parâmetro	Classe 01	Classe 02	Classe 03	Classe 04
Turbidez (UT)	< 5	< 5	< 510	-
Coliformes termotolerantes-CTer (NMP/100 mL)	< 200	< 500	< 500	< 5000
SDT (mg/L)	< 200	-	-	-
Ph	Entre 6,0 e 8,0	-	-	-
Cloro Residual(mg/L)	Entre 0,5 e 1,5	> 0,5	-	-
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	-	-	-	2,0

Fonte: adaptado de ABNT NBR 13969/1997

Eriksson et al., (2001) afirmam que tem havido um interesse crescente no reúso das águas cinzas em muitas partes do mundo incluindo países desenvolvidos e em

desenvolvimento. Porém quando se deseja avaliar a possibilidade de reúso, a caracterização das águas cinzas é de grande importância, tem a finalidade de verificar a qualidade dessa água e adequá-la aos usos previstos, incluindo a necessidade da definição de um pré-tratamento.

Bazzarella (2005), realizou estudos sobre a análise de águas cinzas provenientes de um prédio localizado na UFES (Universidade Federal do Espírito Santo), seguiu com um tratamento em uma Estação de Tratamento de Águas Cinza (ETAC), cujo processo foi baseado na associação de um Reator Anaeróbico Compartimentado, de um Filtro Biológico Aerado Submerso, de um Filtro Terciário e de desinfecção à base de cloro. O tratamento adotado apresentou elevada eficiência na remoção de turbidez, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO5), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e E. coli, e características compatíveis com diversos padrões estabelecidos para o reúso não-potável.

Parte deste tratamento tem adotado a filtração com uma de suas etapas, esta consiste na remoção de poluentes através de um meio poroso que pode reter impurezas de dimensões diversas. Os filtros têm como principal função a remoção de sólido em suspensão, o que é essencial para um possível reúso das águas cinzas, seja para irrigação de áreas verdes ou para descargas de vasos sanitários. A areia, assim como a brita e o carvão ativado, é largamente utilizada como meio filtrante para tratamento de água em geral (SANTANA, 2013).

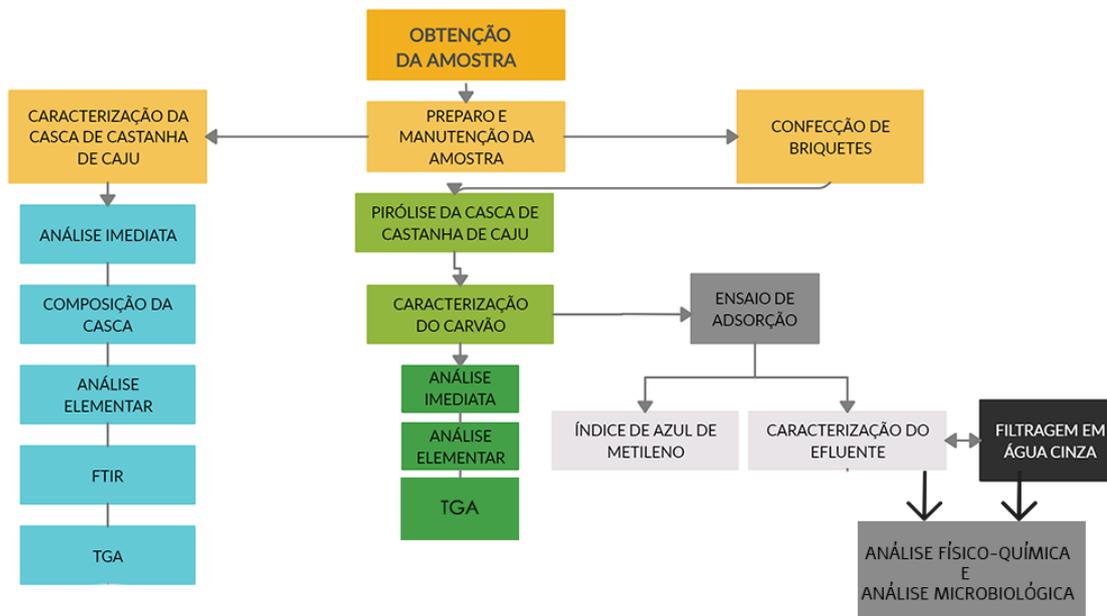
O carvão ativo ou ativado é um destes produtos, utilizados geralmente para remoção de impurezas dissolvidas que geralmente são encontrados em pequenas proporções, porém causam odor, cor e gosto nos fluidos (LEGNER, 2012). Rapoport (2004) sugeriu que em tratamentos de águas residuárias, como é o caso das águas cinzas, o uso de carvão ativado deve ser precedido de um outro tratamento (outro tipo de filtro, por exemplo), objetivando reduzir a carga orgânica e os teores de sólidos, principalmente os sólidos em suspensão. Santana (2013) afirmou que o filtro de carvão ativado tem como uma das principais vantagens a sua reutilização, isso é possível após o processo de regeneração, no qual os materiais previamente adsorvidos são removidos das estruturas dos poros do carvão, deixando-o novamente pronto para sua reutilização. A NBR 13969/1997 no item 5.6,4 descreve que para esgoto de origem essencialmente doméstica ou que possua características similares ao efluente doméstico, o grau de tratamento necessário que consta na classe 01 (usos que requerem o contato direto do usuário com a água), é necessário tratamento aeróbio (filtro aeróbio submerso ou LAB) seguido por filtração convencional (areia e carvão ativado) e, finalmente, cloração.

5. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo será abordado os procedimentos metodológicos da pesquisa. O método do estudo consiste em hipotético dedutivo, visto que surge a partir de um problema, onde se busca a construção de conjecturas e comprovações de sua sustentabilidade.

A primeira parte da pesquisa foi desenvolvida a partir de referências bibliográficas existentes que abordam a problemática do tema. A segunda parte foi conduzida com a pesquisa de campo, no qual realiza-se em laboratório técnicas exploratórias de coleta de dados. Neste contexto, a pesquisa além de exploratória, é qualitativa, buscando compreender o comportamento do carvão ativado da casca de castanha de caju no processo de adsorção de contaminantes da água cinza, caracterizando-o e identificando suas propriedades, sendo acrescentado ao estudo um caráter valorativo. As etapas são ilustradas de forma esquematizada no fluxograma na Figura 5.1.

Figura 5.1- Fluxograma das atividades desenvolvidas



Fonte: AUTORA (2021)

5.1 Obtenção da amostra

A casca de castanha de caju é o resíduo utilizado neste estudo. Foi doada pela fábrica de Castanhas CIONE, na cidade de Caucaia-CE, região nordestina brasileira.

5.2 Preparo da amostra

A casca de castanha de caju foi triturada com a finalidade de obtenção de partículas em menor granulometria para facilitar a aglutinação no processo de moldagem do briquete. A Figura 5.2 exibe a biomassa *in natura* e em seguida, esta, após o processo de trituração.

Figura 5.2- Casca de castanha de caju *in natura* (a) e triturada (b)



Fonte: AUTORA (2021)

5.3 Métodos de Caracterização Química da Casca de Castanha de Caju

5.3.1 Análise Imediata

Consiste em um conjunto de processos que determinam quimicamente teores e propriedades distintas da casca de castanha de caju. Este procedimento foi realizado no Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN) do IFTO – Campus Palmas.

5.3.2 Umidade

Em conformidade com a norma ASTM D 3173-85 (1985), a umidade da Casca de Castanha de Caju é determinada ao adicionar 1g da biomassa em um cadinho de porcelana com massa constante pré-definida. Logo após, a amostra de CCC foi submetida a uma

temperatura de 110 °C em uma estufa por aproximadamente 1 hora. Em seguida, o cadinho foi colocado em um dessecador por 10 minutos e pesado. Sendo assim, o teor de umidade foi determinado segundo a referida Equação (5.1):

$$\% \text{ Umidade} = (A-B) / C \times 100 \quad (\text{Equação 5.1})$$

A= peso do cadinho + amostra, g

B= peso do cadinho + amostra após o aquecimento, g

C= peso da amostra, g

5.3.3 Determinação do Teor de Cinzas

O método de Sanchez et al., (2009), sugere que uma massa de 1g de biomassa seja adicionada a um cadinho de porcelana com massa constante pré-definida, sendo a amostra aquecida em mufla de marca Coel modelo Hm, a uma temperatura de 915 °C por 30 minutos. Posteriormente o cadinho é colocado em um dessecador por 1 hora e pesado. Assim, o teor de cinzas foi determinado conforme a Equação (5.2):

$$\% \text{ Cinzas} = (B-A) / C \times 100 \quad (\text{Equação 5.2})$$

A= peso do cadinho vazio (g)

B= peso do cadinho + amostra após a queima (g)

C= peso da amostra (g)

5.3.4 Determinação do Teor de Material Volátil

O método de Sanchez et al., (2009), sugere que 1g de amostra da biomassa seja adicionada a um cadinho de porcelana com massa constante pré-definida. Em sequência esta amostra é aquecida em uma mufla à temperatura de 900° C, na ausência de oxigênio por um período de 20 minutos. Sendo assim, o teor de material volátil foi determinado pela Equação (5.3):

$$\% \text{ Material Volátil} = (A-B) / C \times 100 \quad (\text{Equação 5.3})$$

A= peso do cadinho + amostra, g

B= peso do cadinho + amostra após o aquecimento, g

C= peso da amostra, g

5.3.5 Determinação do Teor de Carbono Fixo (CF)

É definido pela diferença entre:

$$\text{Carbono Fixo} = 100 - (\% \text{ Umidade} + \% \text{ Cinzas} + \% \text{ Material Volátil}) \quad (\text{Equação 5.4})$$

5.3.6 Análise Elementar (CNH)

De acordo com o método utilizado por Rodrigues (2019) em seus estudos, as amostras de biomassa são analisadas através do método de ignição em um analisador elementar Perkin-Elmer CHNS/O 2400 séries II com o objetivo de determinar os teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio da biomassa. Esta análise foi realizada no Centro Analítico de Instrumentação da Universidade de São Paulo (USP) – (Central Analítica).

5.3.7 Análise Termogravimétrica (TGA)

Através do estudo termogravimétrico, é possível conhecer os parâmetros de Temperatura de Eliminação de Voláteis (TE) e a Temperatura correspondente à máxima taxa de perda de massa ($T_{máx.}$), o primeiro consiste na faixa de temperatura em que ocorre a perda significativa de massa e o segundo parâmetro refere-se ao evento principal de volatilização, relacionado a temperatura onde a perda de material volátil acontece com maior intensidade. Logo, essa análise tem a finalidade de obter informações sobre a variação da massa da amostra em função da temperatura e do estudo cinético, estabelecendo um percentual de perda de material proporcional ao aquecimento aplicado durante as fases do processo. Esta análise foi realizada na Central Analítica da USP.

5.3.8 Espectroscopia no Infravermelho Com Transformada de Fourier (FTIR)

Este procedimento é usado usada para obter um espectro no infravermelho de absorção ou emissão de uma amostra da CCC, ou seja, a presença de grupo funcionais no material por meio de ligações químicas, onde a composição é analisada. Esta análise foi realizada na Central Analítica da USP.

5.4 Briquetagem da biomassa da casca de castanha de caju

Consiste na confecção de briquetes do resíduo. Os briquetes da Casca de Castanha de Caju (CCC) foram feitos a partir de um volume pré-definido. Este volume foi pesado em uma balança de precisão obtendo-se um valor aproximada de 70 g. Foi utilizado a água destilada como ligante na proporção biomassa/ligante 2:1. A confecção dos Briquetes foi realizada no LARSEN – IFTO Campus Palmas, a Figura 5.3. ilustra o briquete da biomassa.

Figura 5.3- Briquete da casca de castanha de caju



Fonte: AUTORA (2021)

5.5 Planejamento Experimental

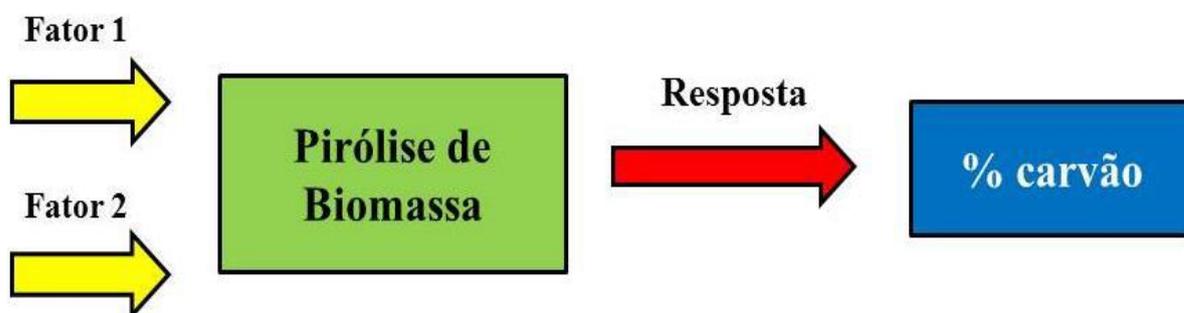
O planejamento experimental foi criado com o objetivo de considerar e observar o comportamento das variáveis temperatura e taxa de aquecimento na produção de carvão durante o processo termoquímico de pirólise da casca de castanha de caju.

O planejamento experimental é uma ferramenta essencial no desenvolvimento de novos processos e no aprimoramento de processos em utilização, além de que um planejamento adequado permite o aprimoramento de processos, a redução da variabilidade de resultados, a redução de tempos de análise e dos custos envolvidos (BUTTON, 2012).

5.5.1 Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) 2²

Por meio do delineamento experimental, foi determinada a influência de dois fatores sobre a pirólise da casca de castanha de caju (temperatura do reator e taxa de aquecimento), conforme a Figura 5.4.

Figura 5.4- Representação do Planejamento Experimental (Delineamento Composto Central Rotacional 2²)



Fonte: RODRIGUES (2019)

O planejamento Experimental adotado nessa pesquisa foi o do tipo Delineamento Composto Central Rotacional 2², sem repetições, apresentando 11 tipos de combinações entre os fatores 01 e 02. Os domínios das faixas dos parâmetros estudados estão de acordo com os escritos bibliográficos de VIEIRA et al., (2009); GOMEZ, (2002); KIM e PARKER, (2008); SHEN e ZHANG, (2004) e INGUANZO et al., (2002). As Tabelas 5.1 e 5.2 mostram os níveis empregados e as ordens dos experimentos, respectivamente.

Tabela 5.1- Fatores e níveis empregados no planejamento experimental (2²).

Fatores	Níveis		
	(-1)	(0)	(+1)
Temperatura Final do Processo (°C)	400°C	500°C	600°C
Taxa de Aquecimento (°C/min)	15°C/min	20°C/min	25°C/min

Fonte: AUTORA (2020)

Tabela 5.2- Ordem dos experimentos empregados no planejamento fatorial DCCR 2²

Ordem dos experimentos	Temperatura (°C)	Taxa de Aquecimento (oC/min)
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1

5	-1,41	0
6	1,41	0
7	0	-1,41
8	0	1,41
9	0	0
10	0	0
11	0	0

Fonte: AUTORA (2020)

5.6 Pirólise da biomassa em Reator de Leito Fixo

Foi utilizado o reator de leito fixo para realização da pirólise da casca de castanha de caju. Os briquetes da biomassa com dimensões de 15 cm de comprimento e 20 cm de diâmetro foram inseridos no equipamento para a conversão térmica. O reator de leito fixo é composto por material de aço inox, onde apresenta 100 cm de comprimento e diâmetro externo de 10 cm como mostra a Figura 5.5. Este reator é aquecido por forno bipartido reclinável (marca FLYEVER, modelo FE50RPN e linha 05/50) e opera por regime de batelada. O vapor de água aquecido a 130 °C em autoclave funciona como o gás de arraste necessário para reação ocorrer. O planejamento experimental foi executado, adotando a temperatura e a taxa de aquecimento conforme foi delineado e o tempo estimado para duração de cada experimento é de 60 minutos. Esta etapa metodológica foi realizada no LARSEN- IFTO/Campus Palmas.

Figura 5.5- Biomassa em Reator de Leito Fixo



Fonte: AUTORA (2021)

No reator há instalado um termopar que opera com a finalidade de monitorar a temperatura durante o processo. Quando o painel informa a temperatura de aquecimento do forno, o termopar aponta a temperatura interna do tubo do equipamento. Esta temperatura é regulada até que se atinja os valores definidos no planejamento experimental.

Após a reação e o resfriamento do reator de pirólise, todos os produtos (líquido e sólido) foram coletados e pesados. O carvão ativado foi recuperado diretamente do reator e os líquidos pirolíticos foram coletados após o sistema de condensação dos vapores em funil de separação de fases.

As Figuras 5.6 e 5.7 demonstram respectivamente, os produtos obtidos do processo da pirólise, o sólido (carvão) e o líquido (bio-óleo e extrato ácido).

Figura 5.6- Produto Sólido (carvão)



Fonte: AUTORA (2021)

Figura 5.7- Processo de Extração do Bio-óleo e bio-óleo extraído



Fonte: AUTORA (2021)

5.7 Procedimentos analíticos empregados na caracterização química do carvão ativado

5.7.1 Análise Imediata

Consiste em um conjunto de processos que determinam quimicamente teores e propriedades distintas do carvão da casca de castanha de caju. Este procedimento foi realizado no Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN) do IFTO – Campus Palmas.

5.7.2 Determinação do Teor de Cinzas do Carvão

A metodologia utilizada para determinação do teor de cinzas é a mesma utilizada para a biomassa bruta. Rodrigues (2019) em seus estudos ilustra os procedimentos sequenciados desta análise, como mostra a Figura 5.8.

Figura 5.8- Determinação do teor de cinzas do carvão



Fonte: RODRIGUES (2019)

5.7.3 Umidade

A metodologia utilizada para determinação da umidade foi a mesma utilizada para a biomassa bruta apresentada na seção 5.3.1.1.

5.7.4 Determinação do Teor de Material Volátil

A metodologia utilizada para determinação do teor de material volátil foi a mesma utilizada para a biomassa bruta apresentada na seção 5.3.1.3.

5.7.5 Teor de Carbono Fixo

A metodologia utilizada para determinação do teor de carbono fixo foi a mesma utilizada para a biomassa bruta apresentada na seção 5.3.1.4.

5.7.6 Análise Elementar (CNH)

De acordo com a metodologia detalhada no item 5.3.3. é possível identificar os teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio nos finos do carvão. Esta análise foi realizada no Centro Analítico de Instrumentação da Universidade de São Paulo (USP) – (Central Analítica).

5.7.7 Análise Termogravimétrica (TGA)

De acordo com o procedimento exposto no item 5.3.4., esta análise foi realizada com a finalidade de obter os dados inerente ao processo de decomposição da lignina presente no carvão da casca de castanha de caju. Esta análise foi realizada no Centro Analítico de Instrumentação da Universidade de São Paulo (USP) – (Central Analítica).

5.8 Ensaio de Adsorção de Azul de Metileno em CCC

O teste foi feito em uma mesa de agitação (Shaker TE 141) com o carvão CCC obtido na temperatura de 500 °C e taxa de aquecimento igual a 20 °C/min, na forma de pó, com granulometria de 0,45 mm. Este ensaio foi realizado no LARSEN-IFTO/Campus Palmas.

A solução corante (Azul de Metileno), de fórmula química $C_{16}H_{18}N_3S \cdot 3H_2O$ foi empregada no teste, sendo utilizados um volume padrão de 30 mL de solução em todos os testes. Após o teste de adsorção, as amostras foram filtradas em papel analítico e a concentração de azul de metileno resultante foi determinada em espectrofotômetro, a 660 nm.

Foi aplicado um planejamento experimental do tipo Delineamento de Faces Centradas (DFC) para se verificar os efeitos de duas variáveis independentes (massa de carvão e concentração da solução do corante) no teste de adsorção. A Tabela 5.3 mostra os níveis dos fatores empregados. O pH da solução do corante foi ajustado a 7. A agitação foi mantida igual a 70 rpm. O tempo de adsorção foi de 30 minutos.

Tabela 5.3- Fatores e níveis empregados

Fatores	Níveis		
	(-1)	(0)	(+1)
Massa do Carvão (g)	0,50	0,75	1
Concentração do Corante (mg/L)	20	60	100

Fonte: AUTORA (2021)

Foram realizados 11 ensaios, sem repetição, sendo 3 deles no ponto central do Planejamento Experimental, de acordo com a Tabela 5.4. Foram definidas três respostas para o planejamento, a saber: (a) absorvância do filtrado, (b) eficiência de remoção e (c) capacidade de adsorção (Q).

Tabela 5.4- Ordem dos experimentos no Planejamento Experimental

Ordem dos Experimentos	X₁	X₂
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1
5	-1	0
6	1	0
7	0	-1
8	0	1
9	0	0
10	0	0
11	0	0

Fonte: AUTORA (2021)

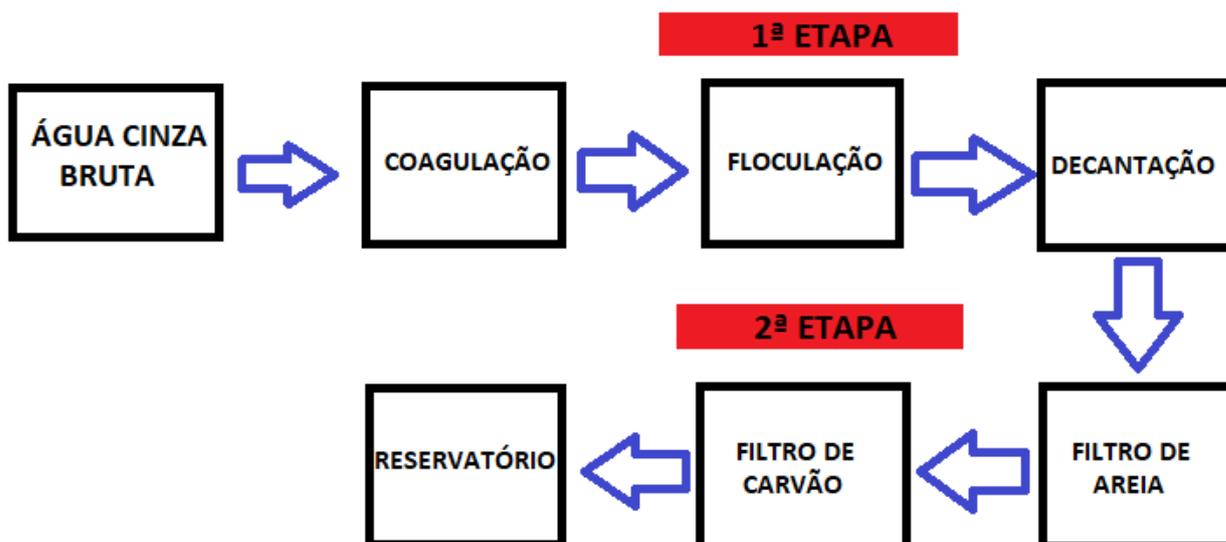
5.9 Sistema de Tratamento de Águas Cinzas

O procedimento metodológico foi realizado no LARSEN- IFTO/Campus Palmas. Este subdividiu-se em duas partes:

1^a etapa- Processo de coagulação/floculação/decantação

2^a etapa- Filtração do efluente do sistema de coagulação em filtro de areia e carvão ativado produzido a partir da casca de castanha de caju, como segue o esquema apresentado na Figura 5.10.

Figura 5.9- Esquema sequenciado de tratamento de águas cinzas



Fonte: AUTORA (2021)

A coleta da água cinza para o estudo teve origem nas pias dos banheiros do IFTO-Campus Palmas. O Campus ocupa uma área de 128.508,38m² e tem capacidade para atender mais de 4.000 mil estudantes, assim como um número relativo de servidores públicos e funcionários terceirizados que circulam pelas dependências deste espaço diariamente, fazendo uso das pias que darão origem a água cinza coletada para a pesquisa.

Nos pontos onde se encontram as pias, através de um reservatório coletor foi coletado amostras desta água, logo após o uso das pessoas e antes do efluente alcançar o sistema de esgoto existente. A água cinza originária da pia foi escolhida para este experimento, pelo fato desta, apresentar um número menor de contaminantes, acreditando que o seu tratamento apresentará melhores resultados em relação aos critérios de qualidade que devem ser obedecidos pela NBR 3969/1997.

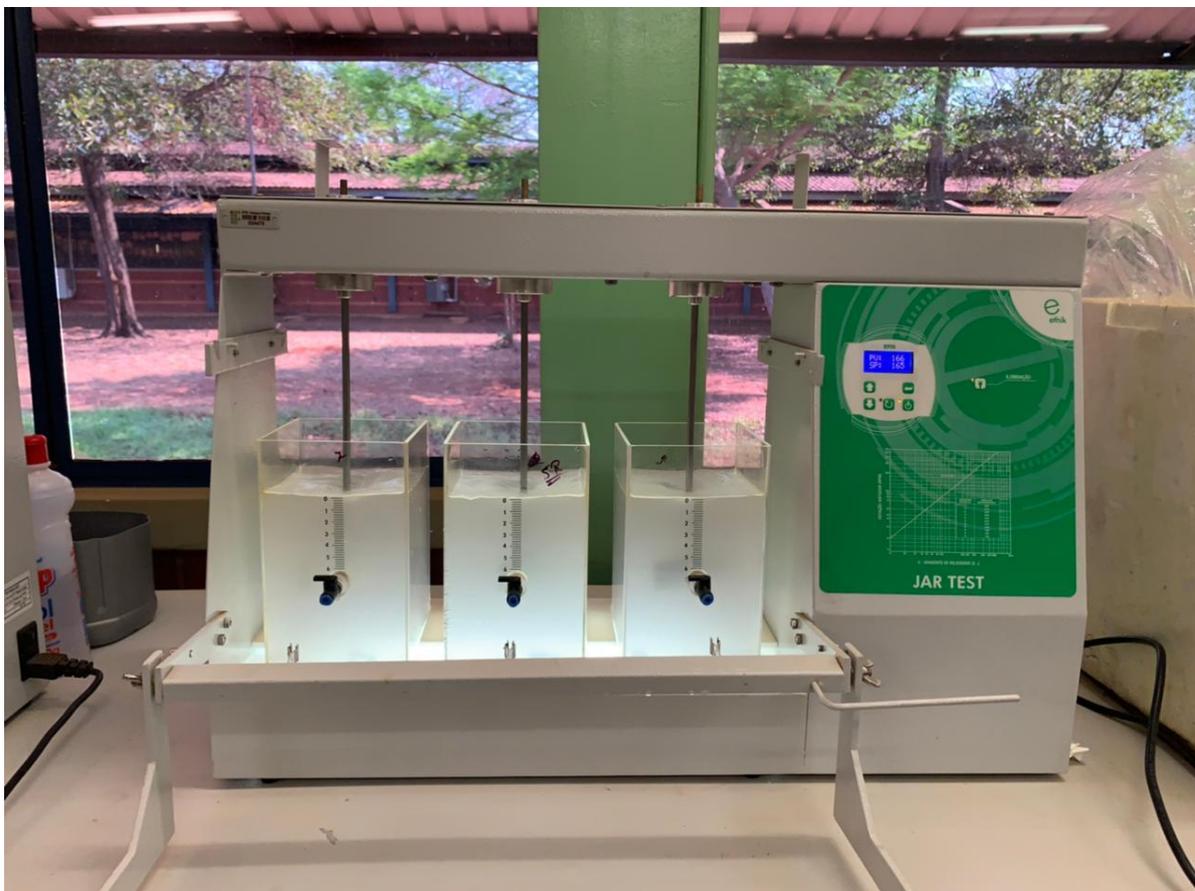
As amostras foram analisadas nas dependências do Laboratório de Águas e Efluentes do IFTO-Campus Palmas.

5.9.1 Ensaios de Coagulação; Floculação e Decantação

A coagulação e floculação consiste em um processo físico-químico para que pequenas partículas sejam agregadas formando flocos capazes de entrar em fase de decantação, facilitando assim a extração da água que segue para as etapas seguintes. Os ensaios dessa etapa foram realizados com o aparelho “Jar Test”, Marca Ethiktechnology, modelo 218-3LDB,

apresentado na Figura 5.11, no LARSEN- IFTO/Campus Palmas. O equipamento possui dispositivo que permite que a velocidade de rotação da mistura seja controlada.

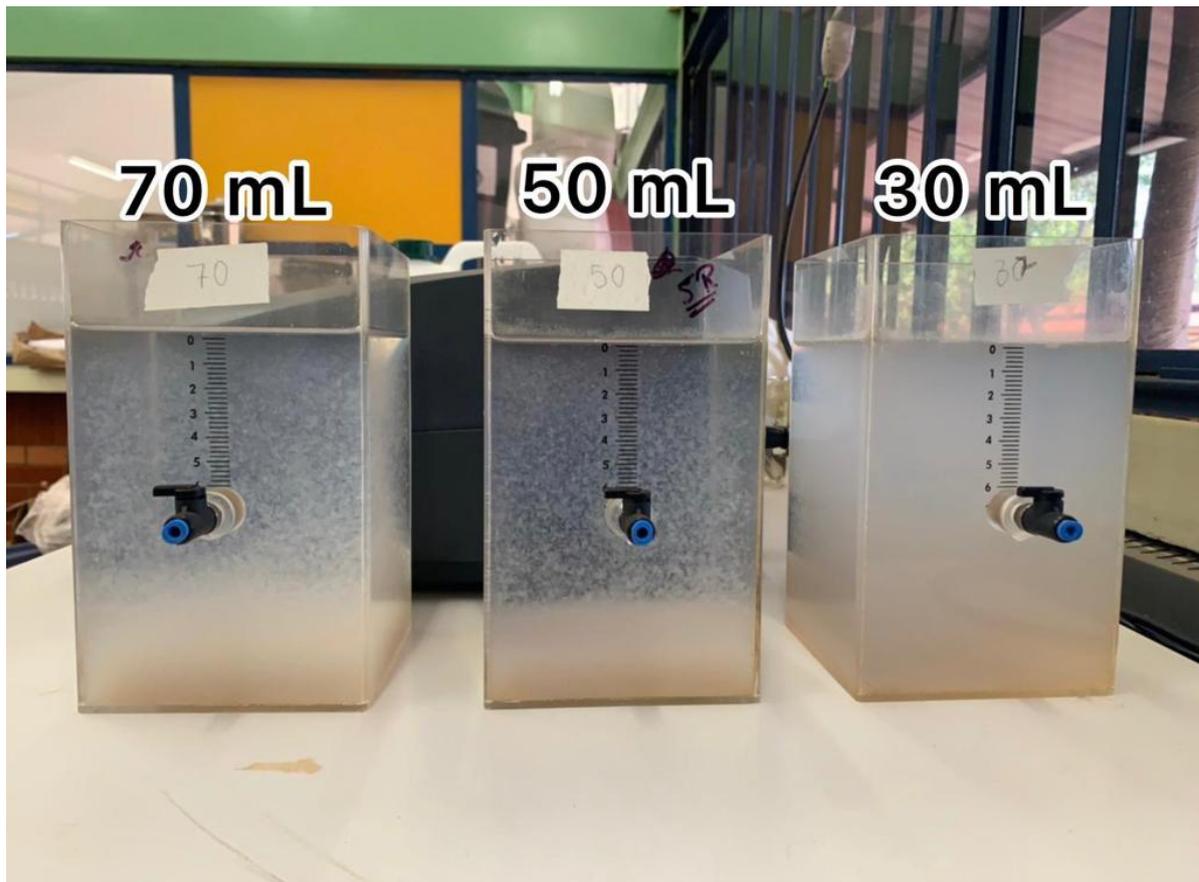
Figura 5.10- Jar Test utilizado nos ensaios de coagulação; floculação e decantação



Fonte: AUTORA (2021)

Para os ensaios descritos acima, o efluente característico da pesquisa é a água cinza bruta, esta, antes do processo de coagulação/floculação teve seu pH corrigido com ácido clorídrico, o que possibilitou convertê-la para as proximidades da neutralidade. As dosagens do coagulante químico Sulfato de Alumínio seguiram os valores indicados na metodologia de (SOUZA, 2012). Conforme a Figura 5.12, nos 3 recipientes do equipamento “Jar Test” que contém 2 L de água cinza cada, foi adicionado 3 dosagens distintas do coagulante Sulfato de alumínio, sendo estas 30 mL, 50 mL e 70 mL, respectivamente.

Figura 5.11- Dosagem de Sulfato de alumínio aplicadas nos recipientes que possuem amostra de água cinza.



Fonte: AUTORA (2021)

As velocidades de mistura rápida e lenta empregadas nos testes foram de 165 e 30 rpm, respectivamente. Os tempos de mistura rápida e lenta foram de 3 minutos e 20 minutos, respectivamente. O tempo de sedimentação foi de 1 hora. Após o ensaio, as amostras foram coletadas de cada cuba do Jar test para a realização de outros parâmetros físico-químicos, como os de pH, turbidez e sólidos, entre outros.

5.9.2 Tratamento do efluente em filtro de areia e carvão obtido da pirólise da casca de castanha de caju

O sistema de filtração se encontra no LARSEN/ IFTO-Campus Palmas, onde o ensaio foi realizado. Dois filtros em regime contínuo e em série foram operados para o polimento das águas cinzas, cada filtro em formato cilíndrico contém material interno distinto, areia e carvão, respectivamente, este último é subproduto da pirólise da casca de castanha de caju. O material externo do filtro é PVC e este apresenta as seguintes dimensões: altura total do tubo 40 cm, altura do carvão na coluna 11 cm, diâmetro do tubo de 2,0 cm.

Amostras foram coletadas, antes e após o tratamento, visando efetuar o monitoramento da qualidade do efluente. As recomendações seguiram a metodologia proposta por APHA/AWWA/WEF (1998), onde também sugere os parâmetros presentes na Tabela 5.5. Todos estes procedimentos serão realizados no Laboratório de Análises Físico-Químicas de Águas do IFTO -Campus Palmas.

Tabela 5.5- Parâmetros para a caracterização físico-química de águas cinzas e efluente

PARÂMETRO	METODOLOGIA
Temperatura	Termômetro de mercúrio
pH	Eletrométrico
DQO	Refluxação Fechada
Condutividade	Eletrométrico
Sólidos Totais	Gravimétrico
Sólidos Fixos	Gravimétrico
Sólidos Voláteis	Gravimétrico
Alcalinidade	Volumétrico
Turbidez	Nefelométrico
Cloretos	Mohr
Ortofosfato solúvel	Espectrofotométrico
Cloro Residual	Espectrofotométrico
Amônia	Espectrofotométrico
Coliformes Totais	Colilert
<i>E. coli</i>	Colilert

Fonte: AUTORA (2020) adaptado de RODRIGUES (2019)

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Caracterização da Biomassa (Casca de Castanha de Caju)

A seguir são apresentados os resultados obtidos das referidas análises em relação a Caracterização Química da biomassa em estudo: Análise imediata, análise elementar (CNH), termogravimétrica (TGA), espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e microscopia eletrônica de varredura- MEV.

6.1.1 Análise Imediata da Casca de Castanha de Caju

Por meio da análise imediata da biomassa desta pesquisa, foram determinados os teores de umidade, cinzas, material volátil e carbono fixo apresentados na Tabela 6.1.

A casca de castanha de caju apresentou um teor de umidade de 6,1%, resultado próximo ao encontrado por Figueiredo (2011) e Moreira (2015) nas suas pesquisas utilizando a CCC. Rodrigues (2019), relata em sua pesquisa com casca de arroz que biomassas com baixa umidade facilitam sua utilização como combustível, já que aumenta a quantidade de energia convertida em calor. Almeida, (2008), diz que valores de umidade em biomassa menores que 10% são adequados para transformação em processos termoquímicos como a pirólise e a gaseificação. Logo, o valor do teor de umidade encontrado neste estudo se encontra adequado para o processo de degradação térmica.

O teor de cinzas encontrado para CCC foi de 2%, próximo ao valor encontrado no estudo de Figueiredo (2011). Mas se comparado ao de Moreira (2015) que foi de 5,3%, há uma diferença mais significativa, pois de acordo com este autor, a metodologia usada para a realização do ensaio pode ser um dos motivos para esta diferença, principalmente em relação à temperatura de queima da amostra, já que o teor de cinzas é composto basicamente de óxidos metálicos, por não sofrerem combustão. Altos teores de cinzas pode causar problemas de incrustações, entupimentos e corrosão em processos de combustão e pirólise, resultando em aumento dos custos de operação (SAIT et al., 2012). Neste contexto, o baixo teor de cinzas da CCC, resulta em uma boa eficácia em processos termoquímicos de conversão da biomassa.

Considera-se alto o teor de material volátil encontrado para CCC (75,1%). Segundo García et al., (2012), um alto teor de material volátil apresenta relação direta à facilidade destas biomassas entrarem em ignição em baixas temperaturas e com estabilidade de chama.

O teor de carbono fixo está diretamente relacionado ao material volátil. Para Corton et al., (2016), quanto menor a composição de cinzas e carbono fixo, maior o teor de material volátil. Identifica-se um valor de carbono fixo de 16,8% para a biomassa em estudo, o que indica o resíduo que sobra após a eliminação dos compostos voláteis (isentos de umidade e cinzas), no qual está associado a parcela de material combustível que pode ser oxidada por processos de queima.

Tabela 6.1- Resultados obtidos por meio da Análise Imediata da casca de castanha de caju

Variável Analítica	Casca de Castanha de Caju	Outros Autores	
	desta pesquisa	Figueiredo, (2011)	Moreira (2015)
Umidade (%)	6,1	7,6	8,9
Cinzas (%)	2	1,6	5,3
Material Volátil (%)	75,1	78,4	70,9
Carbono Fixo (%)	16,8	20,1	23,8

Fonte: AUTORA (2021)

6.1.2 Análise Elementar (CNH) da Casca de Castanha de Caju

Esta análise fornece em porcentagem as quantidades do Carbono (C), Hidrogênio (H) e do Nitrogênio (N) e Oxigênio (O) por diferença, presentes na biomassa. Este estudo também permite conhecer o potencial de poder calorífico através de método matemático. Os resultados obtidos da análise deste estudo são apresentados na Tabela 6.2, assim como os resultados da análise elementar de outros autores que também estudaram esta biomassa.

Tabela 6.2- Análise Elementar da Casca de Castanha de Caju

Elementos Químicos	Casca de Castanha de Caju	Outros autores	
	Triturada desta pesquisa (%)	Figueiredo (2011)	Moreira (2015)
Carbono	49,10	52,91	40,09
Hidrogênio	6,28	6,87	6,04
Nitrogênio	0,61	0,78	0,7
Oxigênio	44,01	39,44	53,17

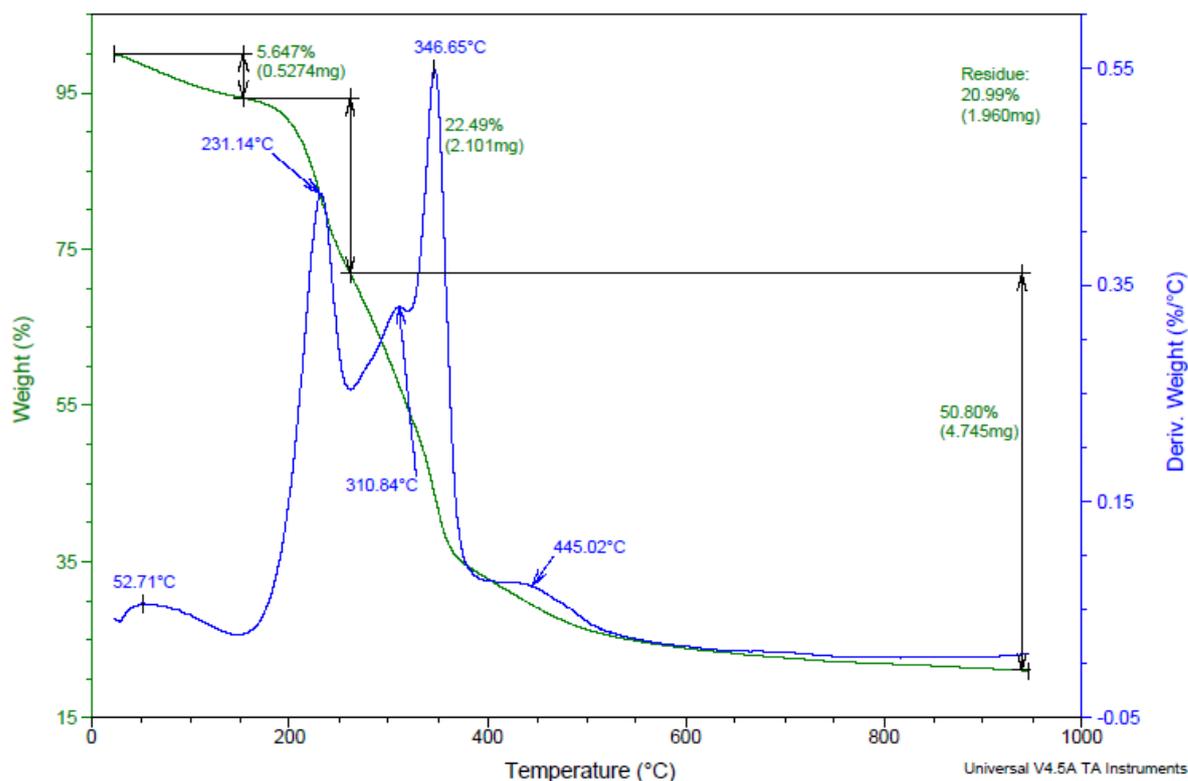
Fonte: AUTORA (2020)

Com efeito comparativo, os valores das frações mássicas de C, H e N presentes na biomassa desta pesquisa não se distanciaram dos resultados obtidos nos estudos de Figueiredo (2011) e Moreira (2015). O resultado da relação carbono/hidrogênio (C/H) foi de 7,8. De acordo com Pereira Jr (2001) quanto maior a concentração de carbono e hidrogênio na biomassa mais elevado é o seu poder calorífico, porém, alta concentração de oxigênio implica menor poder calorífico.

6.1.3 Análise Termogravimétrica (TG) da Casca de Castanha de Caju

Segundo Figueiredo (2011) a curva de TG apresenta duas etapas relevantes, a primeira, a temperaturas mais baixas, que podem ser atribuídas à perda de água e a segunda, a temperaturas mais altas, que podem ser atribuídas à degradação da biomassa, cujos componentes principais são a celulose, as hemiceluloses e a lignina. A Figura 6.1, apresenta o resultado desta análise.

Figura 6.1- Curva de degradação termogravimétrica da Casca de Castanha de Caju *in natura*



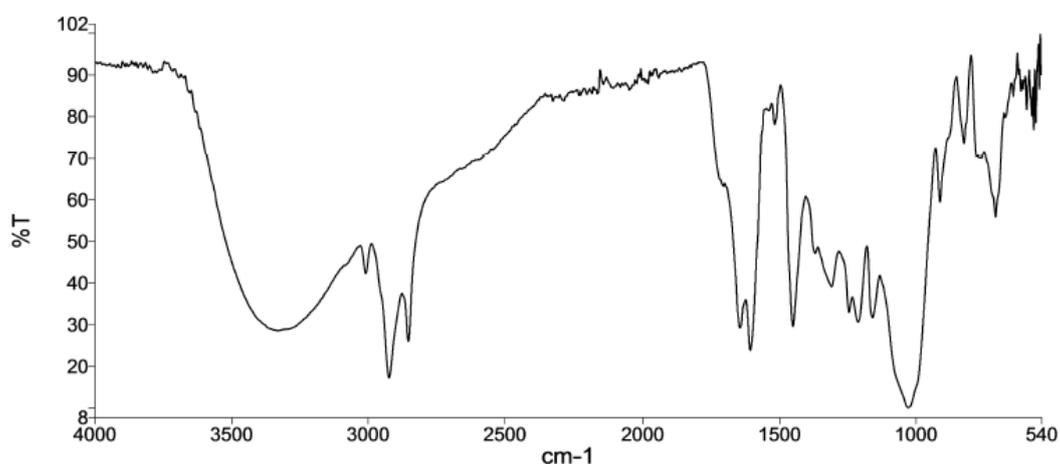
Fonte: AUTORA (2021)

São observados 05 eventos de perda de massa da biomassa em função do aumento da temperatura. O primeiro evento (temperatura 52 °C) corresponde à perda parcial de água da amostra. O segundo evento (temperatura 231°C) correspondente a continuação da eliminação de água bem como de outros componentes voláteis da biomassa. Os três próximos eventos (temperaturas de 310, 346 e 445 °C, tratam do processo gradual de perda de massa, atribuídos a decomposição da matéria orgânica. De acordo com a literatura, esse estágio corresponde primeiramente à decomposição da hemicelulose de 200 °C a 320 °C e em seguida da celulose de 320 °C a 450 °C, enquanto que a degradação da lignina ocorre a partir de 400°C se estendendo até temperaturas maiores que 570°C.

Ainda com relação à curva TG, pode-se confirmar os valores obtidos na análise imediata observando a perda de massa na análise termogravimétrica. Com isso, temos que, o percentual de umidade a 170 °C refere-se a uma perda de massa da ordem de 5,64 %, valor bem próximo ao teor de umidade obtido na análise imediata 6,1 %. Por outro lado, o percentual de materiais voláteis a 900 °C é de 73,29%, relativamente equivalente ao teor determinado pela análise imediata 75,1%. Logo se observa que os dados da análise imediata corroboram com os da análise instrumental.

6.1.4 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada Fourier – FTIR da Casca de Castanha de Caju

Esta análise multi-elementar permite a determinação simultânea da concentração de vários elementos da biomassa utilizada no método, caracterizando os grupos funcionais da amostra. Conforme Rodrigues (2019), os efeitos da interação da radiação de infravermelho com a biomassa estudada ocasionam o aparecimento de comprimento de ondas que estão associadas a grupos funcionais e a composição da matéria. A Figura 6.2 mostra o espectro de FTIR da casca de castanha de caju.

Figura 6.2- Análise de FTIR da Casca de Castanha de Caju**Gráfico do espectro**

Fonte: AUTORA (2020)

As principais bandas de absorção são correspondentes às ligações hidrogênio-oxigênio (O-H), carbono-oxigênio (C-O), carbono-carbono (C-C), carbono-hidrogênio (C-H) e silício-oxigênio (Si-O). Em concordância com os escritos bibliográficos de Moreira (2015) apud Fisher (2002) a respeito da análise de FTIR da casca de castanha de caju e alguns bio-óleos, sendo estes semelhantes aos resultados obtidos nesta pesquisa, foram identificados os seguintes grupos funcionais atribuídos as bandas de absorção onde se encontram ligações químicas, conforme Tabela 6.3.

Tabela 6.3- Relação de funções químicas identificadas no espectro FTIR da casca de castanha de cajueiro

Comprimento de onda (cm⁻¹)	Ligações	Grupo Funcional
3500 a 3789,26	O-H	Presença de água
3010,48 a 2924,79	C-H	Presença de Alcanos
1643,39 a 1605,99	C-O	Presença de aldeídos, cetonas ou ácidos carboxílicos
1449,38	C-C	Presença de alcoóis primários, secundários e terciários
1027,21	Si-O	Presença de grupos aromáticos substituídos como os fenóis

Fonte: AUTORA (2020) adaptado de MOREIRA (2015)

A presença de 2 picos nas ligações de (C-H) com ordem de comprimento de 3010,48 cm⁻¹ a 2924,79 cm⁻¹ são típicos de deformação axial e a banda larga em 1027,21 cm⁻¹ atribuída

a grupos aromáticos sugere que os compostos aromáticos fenólicos presentes na casca de castanha de caju são degradados durante a pirólise levando a formação de novos compostos.

6.2 Rendimento das frações obtidas na pirólise da Casca de Castanha de Caju

O planejamento experimental que teve como objetivo investigar o rendimento das frações de carvão ativado da casca de castanha de caju considerando dois fatores de variância: temperatura do reator e taxa de aquecimento. Os rendimentos são expostos na Tabela 6.4.

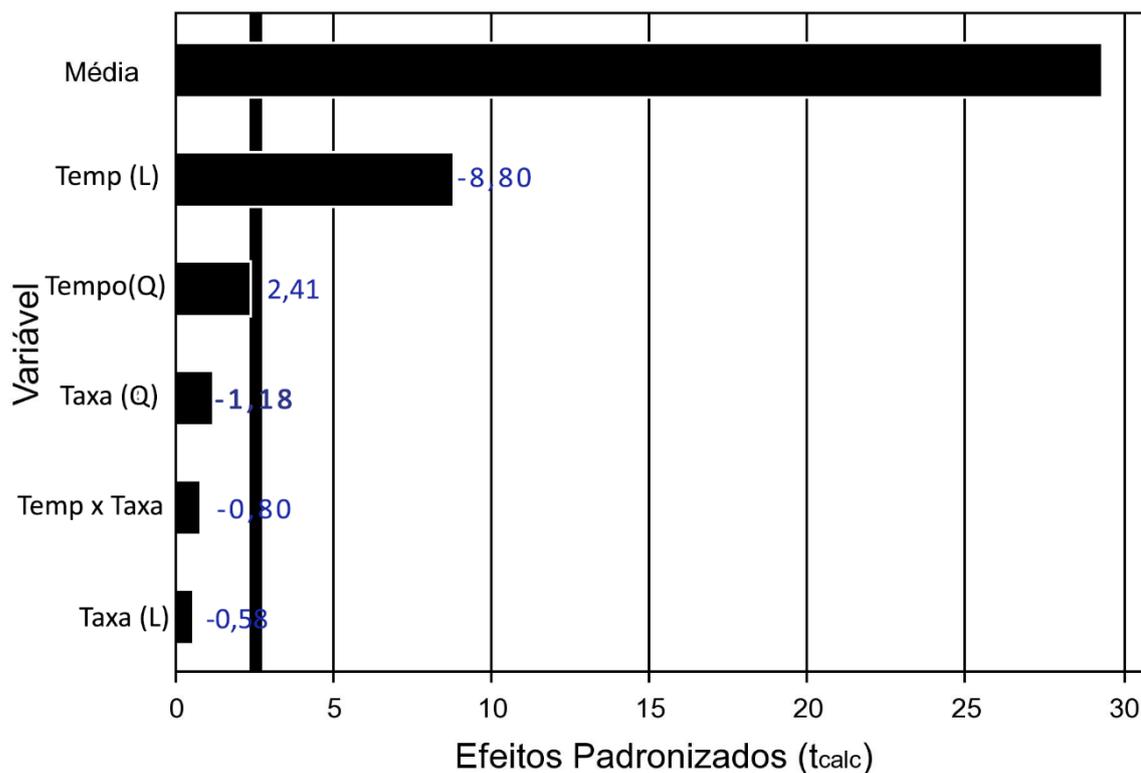
Tabela 6.4- Rendimento das frações obtidos do Planejamento Experimental

Experimento	Temperatura (°C)	Taxa de Aquecimento (°C/min)	Rendimento do Carvão (%)
1	400°C	15°C/min	41,40
2	600°C	20°C/min	32,40
3	400°C	25°C/min	42,40
4	600°C	25°C/min	30,40
5	358,58°C	20°C/min	49
6	641,42°C	20°C/min	27,50
7	500°C	12,93°C/min	33
8	400°C	27,07°C/min	31,10
9	500°C	20°C/min	33,10
10	500°C	20°C/min	36,10
11	500°C	20°C/min	35,20

Fonte: AUTORA (2020)

Com base nos dados gerados do Planejamento Experimental o Diagrama de Pareto apresentado na Figura 6.3, mostra que a temperatura (Temp) teve ação negativa (-8,80) para a parcela sólida. Isto revela que, com o aumento da temperatura (500°C para 600°C) houve uma redução do rendimento de carvão.

Figura 6.3- Representação do Diagrama de Pareto



Fonte: AUTORA (2021)

De acordo com PEDROZA (2011), a redução no rendimento da fração sólida com o aumento da temperatura pode ser devido à devolatilização dos compostos orgânicos sólidos, assim como a gaseificação parcial de resíduos carbonosos no carvão em altas temperaturas, pois a devolatilização é resultado da soma dos componentes individuais da biomassa: celulose, hemicelulose, lignina e extrativos.

Os coeficientes de regressão dos fatores estudados e da interação entre eles gerados durante a produção de carvão da CCC são apresentados na Tabela 6.5.

Tabela 6.5- Coeficientes de regressão do Planejamento DCCR 2² gerado da produção de carvão da casca de castanha de caju em pirólise com intervalo de confiança de 95%.

Fatores	Coeficiente de Regressão	Erro padrão	T-calculado	P-valor
Média	34,80	1,19	29,36	0,0000
Temp	-6,39	0,73	-8,80	0,0003
Temp ²	2,08	0,86	2,41	0,0609
Tx	-0,42	0,73	-0,58	0,5850
Tx ²	-1,02	0,86	-1,18	0,2913
Temp - Tx	-0,82	1,03	-0,80	0,4580

Fonte: AUTORA (2021)

Os coeficientes de regressão, gerados através da matriz codificada, possibilitou traçar o modelo ajustado que expõe a obtenção de carvão durante a pirólise da biomassa experimentalmente, conforme a Equação 6.1.

Embora a taxa de aquecimento não apresente efeitos significativos (-0,42), a temperatura (-6,39) demonstra efeitos relevantes um nível de confiança de 95 %, conforme demonstrado na Tabela 6.5. Apesar dos demais efeitos não se apresentarem de forma significativa, é essencial mantê-los na equação do modelo para preservação da hierarquia matemática (BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2007).

$$\text{Rendimento de Carvão}(\%) = 34,80 - 6,39X_1 + 2,08X_1^2 - 0,42X_2 - 1,02X_2^2 - 0,82X_1X_2 \text{ (Eq.6.1)}$$

Onde: X1 = Temperatura (°C); X2 = Taxa de aquecimento (°C/min);

A Tabela 6.6 expõe a análise de variância (ANOVA) para a produção de carvão na pirólise da casca de castanha de caju.

Tabela 6.6- ANOVA para a produção de carvão por meio do processo de pirólise de casca de castanha de caju em reator de leito fixo.

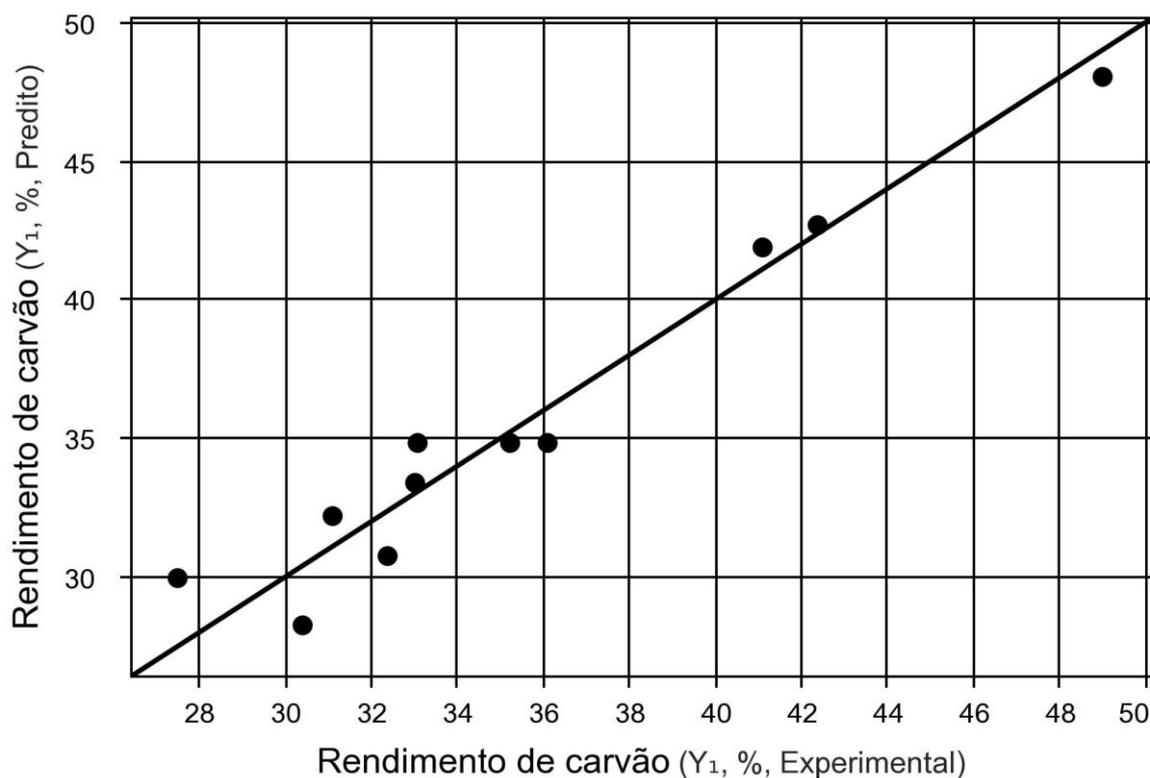
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Fcalculado	P-valor
Regressão	371,5	5	74,3	17,6	0,00342
Resíduos	21,1	5	4,2		
Falta de ajuste	16,3	3	5,4	2,3	0,31769
Erro puro	4,7	2	2,4		
Total	392,6	10			

$R^2 = 0,9463$; $F_{tab}(5; 5; 0,05) = 5,05$

Fonte: AUTORA (2021)

O coeficiente R^2 atingido pela regressão foi de 0,9463, o que sugere um bom ajuste do modelo. Este fato se justifica com a aglomeração de pontos próximos a reta representativa, conforme a Figura 6.4, cujo o gráfico indica os valores pressupostos com base no planejamento experimental em comparação com os valores observados após o processo de pirólise.

Figura 6.4- Valores analisados versus valores pressupostos, para a obtenção de carvão da biomassa CCC.

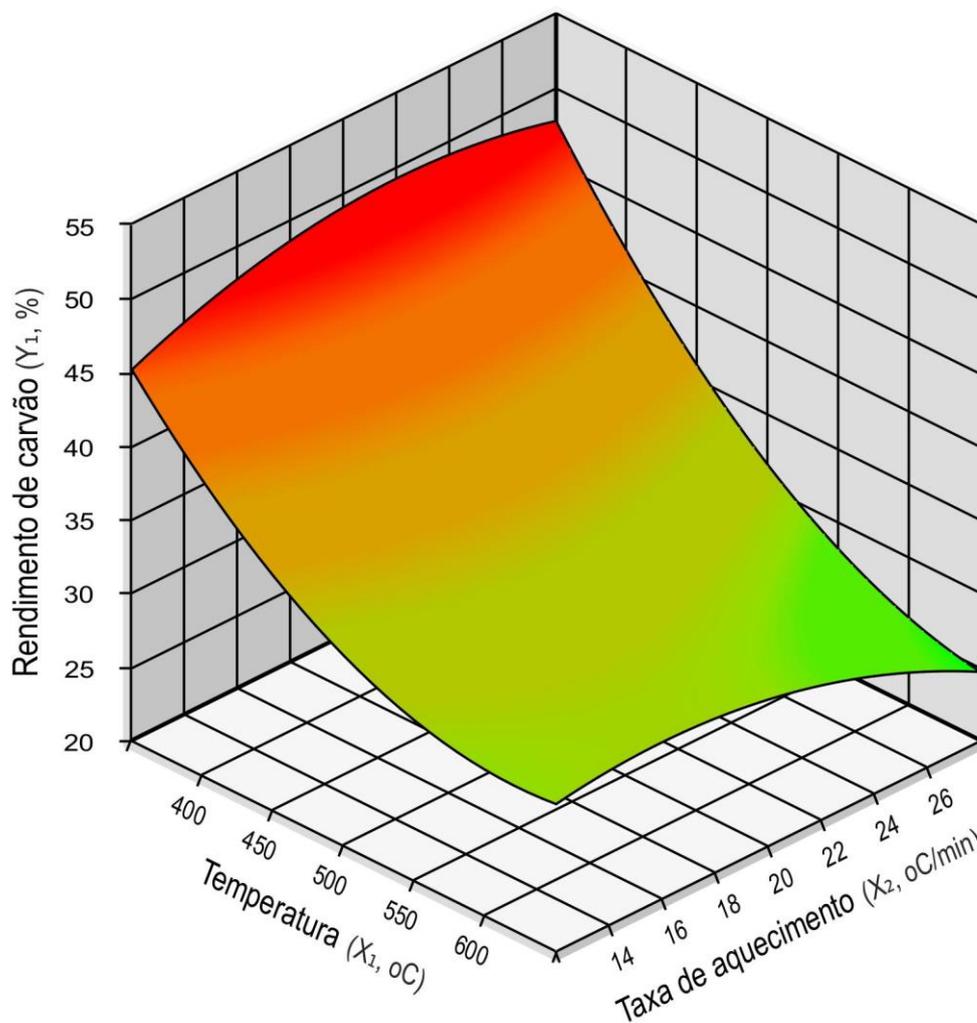


Fonte: AUTORA (2021)

Por meio do teste F. realizado, foi possível confirmar a significância do modelo gerado pela análise da variância (ANOVA) que consta na Tabela 6.6. Determinou-se o valor de F_{calc} através da expressão $F_{calc} = \text{Regressão do Quadrado médio} / \text{Quadrado médio residual}$. Ao comparar o valor de F_{calc} (17,6) para a regressão do valor de F_{tab} ($F_{tab} = 5,05$), nota-se uma regressão considerável.

De acordo com Pedroza et al., (2021), os dados experimentais são bem representados pelo modelo ajustado, ou seja, o modelo obtido para as variáveis significativas pode ser usado para fins preditivos dentro do domínio dos fatores estudados. Logo, é possível criar a superfície de resposta e curvas de contorno com os resultados gerados por meio do planejamento experimental. Neste caso, é então possível construir com os dados experimentais obtidos. Observa-se na Figura 6.5, que a quantidade máxima de carvão foi alcançada em circunstâncias de baixa temperatura, como mostra as regiões destacadas em vermelho.

Figura 6.5- Superfície de Resposta para a obtenção de carvão gerado a partir da pirólise da biomassa CCC com variáveis de Temperatura e Taxa de aquecimento



Fonte: AUTORA (2021)

6.3 Caracterização química dos produtos de pirólise da Casca de Castanha de Caju

6.3.1 Análise Imediata e Elementar do Carvão (CNH)

São apresentados na Tabela 6.7 os teores de umidade, cinzas, material volátil e carbono fixo do carvão obtido através do processo de pirólise da CCC nas seguintes condições: Temperatura 500 °C/ Taxa de aquecimento 20°C/min e Temperatura 500 °C/ Taxa de aquecimento 27°C/min, ambos com tempo de residência das fases de 30 minutos.

Tabela 6.7- Análises Imediatas e Elementares (CNH) das amostras de carvão pirolítico da biomassa CCC

Variável Analítica (%)	Carvão Pirolítico	
	(Temperatura 500 °C/ Taxa de aquecimento 20° C/min)	(Temperatura 500 °C/ Taxa de aquecimento 27° C/min)
Umidade (%)	5,1	5,3
Cinzas (%)	6,4	6,6
Material Volátil (%)	31,2	27,1
Carbono Fixo (%)	57,3	61

Fonte: AUTORA (2020)

Observa-se um baixo teor de umidade do biocarvão da CCC, no qual é condizente com a redução da água na biomassa em decorrência da exposição a altas temperaturas. O teor de cinzas varia entre 6,4% e 6,6%. Valores altos de cinza podem indicar baixo poder calorífico (RODRIGUES, 2019), porém este acontecimento não interfere no objetivo deste estudo.

No que diz respeito ao carbono fixo do carvão vegetal em estudo, este foi de 57,35 e 61%. Observa-se um aumento nestes valores, quando comparado ao valor de carbono fixo da biomassa *in natura* (16,8%). Conforme Costa (2011), altos teores de material volátil implicam em menor teor de carbono fixo, enquanto que o inverso também ocorre. O teor de material volátil foi de 57,3 % e 61% para o biocarvão, em contrapartida, na biomassa bruta encontra-se um valor acima (75,1%). Constata-se que houve uma redução de material volátil durante a pirólise, resultando em um aumento de carbono fixo no carvão oriundo da degradação térmica da casca de castanha de caju.

A Tabela 6.8 mostra os resultados dos teores de carbono, nitrogênio, hidrogênio e oxigênio das amostras de biocarvão originário da pirólise da CCC nas condições de 500 °C de temperatura e 20° C/min de taxa de aquecimento, por 30 minutos. Também são indicados o percentual dos elementos químicos C; H; N e O, este último por diferença, presente na amostra.

Tabela 6.8- Resultado da Análise Elementar do carvão obtido por meio do processo de pirólise da CCC.

Elementos Químicos Casca de Castanha de Caju Triturada desta pesquisa (%)	Carvão Pirolítico desta pesquisa	Outros Autores	
		Figueiredo (2011)	Moreira (2015)
Carbono (%)	75,66	83,14	67,0
Hidrogênio (%)	2,47	2,61	1,4

Nitrogênio (%)	1,05	1,37	0,1
Oxigênio (%)	20,82	12,88	31,5

Fonte: (AUTORA, 2020)

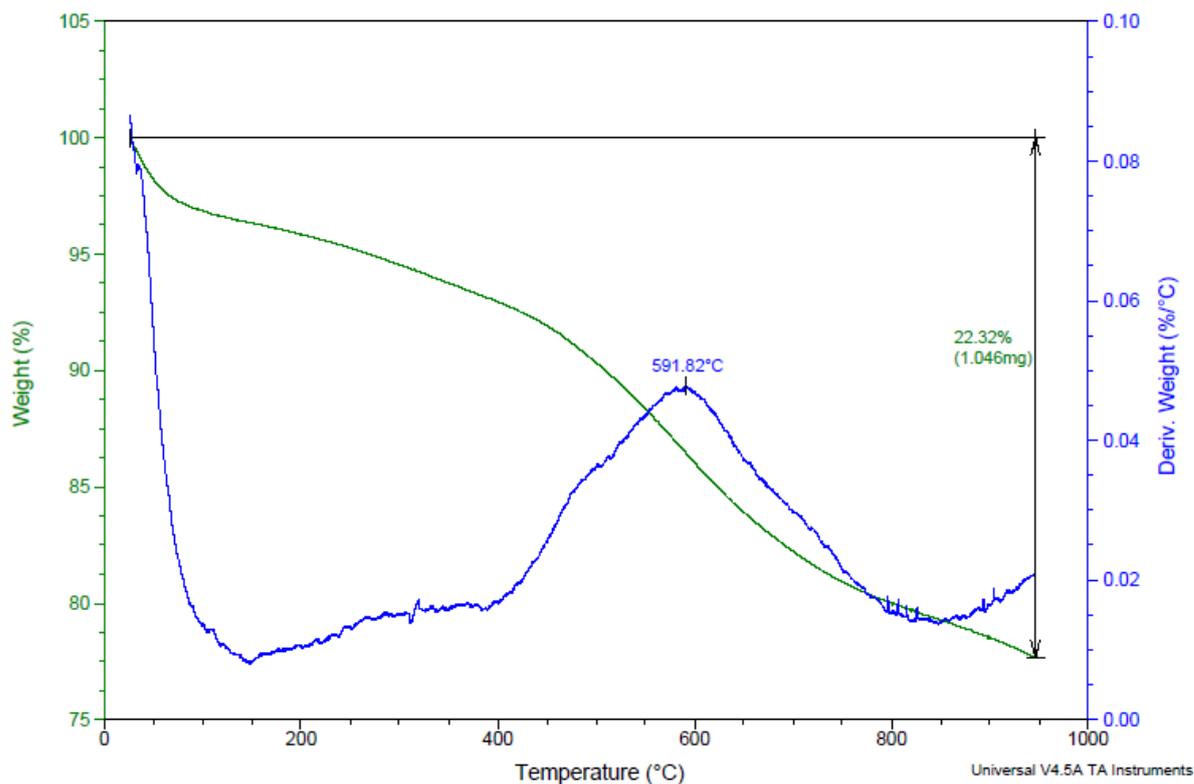
Os valores obtidos nesta pesquisa por meio da análise elementar mostram-se próximos aos obtidos por Figueiredo (2011) e Moreira (2015). O biocarvão derivado da casca de castanha de caju 75,66 % de Carbono, Hidrogênio 2,47 %, Nitrogênio 1,05 % e Oxigênio 20,82%.

Os teores de carbono são elevados no carvão, o que significa um importante parâmetro para utilização deste como fonte energética. Ainda sobre os resultados dos teores de carbono, nota-se que não há modificações significativas nas concentrações deste elemento químico em relação aos valores apresentados por Figueiredo (2011) e Moreira (2015), mesmo que estes, tenham realizado o ensaio em condições semelhantes e não iguais ao da pesquisa. Acerca da relação C/H, o carvão da casca de castanha de caju apresentou um valor de 30,6, sendo superior ao valor obtido da relação C/H da biomassa *in natura* (7,8). Conforme SOARES et al., (2014) uma relação de grande importância na pirólise de biomassa é a relação carbono/hidrogênio. Ainda em concordância com autores essa relação tende a aumentar no carvão quando comparado com a biomassa, devido a maior aromatização e alteração química do material.

6.3.2 Análise Termogravimétrica (TGA) do carvão da pirólise da casca de castanha de caju

A Figura 6.6 exibe as curvas termogravimétricas para o carvão da casca de castanha de caju.

Figura 6.6- Análise Termogravimétrica (TGA) do carvão da CCC



Fonte: AUTORA (2021)

É possível identificar que nos intervalos de 25°C a 230°C há nesta faixa de temperatura uma perda que pode ser considerada como a eliminação fração líquida do material, ou seja, a umidade. A partir de 230°C, observa-se uma curva paulatinada que pode ser associada a degradação térmica do carbono fixo e da massa do material presente no carvão obtido da pirólise da casca de castanha de caju.

6.4 Teste de adsorção do índice de azul de metileno

Nessa etapa da pesquisa foi realizada a adsorção do corante azul de metileno no carvão ativado gerado através da pirólise da casca de castanha de caju, sendo observados os parâmetros de concentração residual de azul de metileno (Y_1 , (-)) e capacidade de adsorção (Q , mg/g).

O método escolhido foi o Delineamento de Faces Centradas (DFC) definido no Planejamento Experimental (descrito nos procedimentos metodológicos) considerou que as variáveis investigadas para o teste de adsorção do índice de azul de metileno são: massa do carvão (X_1) e concentração do corante (X_2). Os resultados são apresentados na Tabela 6.9.

Tabela 6.9- Resultado do teste de adsorção sob efeito das duas variáveis independentes (massa de carvão e concentração da solução do corante)

Experimentos	Massa do Carvão (g)	Concentração do Corante (mg/L)	Absorbância do filtrado	Eficiência de remoção (%)	Capacidade de adsorção (mg/g)
1	0,50	20	0,22	92,78	1,11
2	1	20	0,12	95,81	0,57
3	0,50	100	0,58	96,37	5,78
4	1	100	0,39	97,52	2,26
5	0,50	60	0,25	97,29	3,50
6	1	60	0,15	98,30	1,77
7	0,75	20	0,17	98,10	0,75
8	0,75	100	0,40	95,77	3,90
9	0,75	60	0,24	97,39	2,34
10	0,75	60	0,24	97,49	2,34
11	0,75	60	0,23	97,29	2,33

Fonte: AUTORA (2021)

6.4.1 Absorbância do carvão da CCC (Y)

Por meio da regressão linear foi gerado o intervalo espectral da adsorção do azul de metileno e a construção do gráfico analítico linear da absorbância, o que nos permite observar a relação estatística desta variável em relação a outras. Na Tabela 6.10 são apresentados os efeitos da interação entre as variáveis para o resultado de absorbância das amostras filtradas.

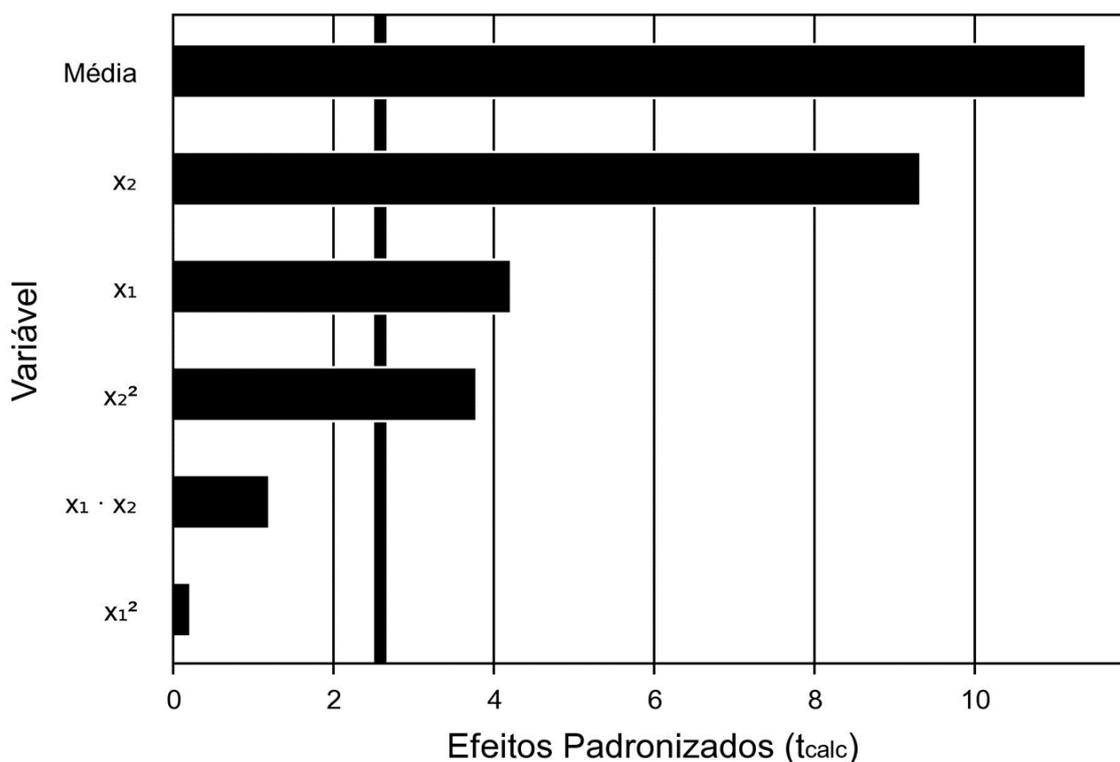
Tabela 6.10- Coeficientes de regressão do Planejamento DFC

Fatores	Coefficiente de Regressão	Erro Padrão	t-calculado	p-valor
Média	0,22	0,02	11,37	0,0001
X ₁	-0,06	0,02	-4,22	0,0083
X ₁ ²	0,01	0,02	0,21	0,8412
X ₂	-0,14	0,02	9,31	0,0002
X ₂ ²	0,09	0,02	3,80	0,0126
X ₁ – X ₂	-0,02	0,02	-1,19	0,2862

Fonte: AUTORA (2021)

O Diagrama de Pareto ilustrado na Figura 6.7 destaca quais variáveis tem efeitos mais significativos sobre absorvência do carvão ativado originário da pirólise casca de castanha de caju. Observa-se que 80% desta consequência está relacionado a concentração de corante, o que corresponde a 20% das causas apresentadas neste conjunto de fatores.

Figura 6.7- Diagrama de Pareto da absorvência do carvão da CCC



Fonte: AUTORA (2021)

Conforme a Equação 6.1 gerada por meio da análise de regressão, esta descreve a relação estatística entre os fatores de variância aqui expostos.

$$\text{Absorvência} = 0,22 - 0,06 X_1 + 0,01 X_1^2 + 0,14 X_2 + 0,09 X_2^2 - 0,02 X_1 X_2 \quad (\text{Eq. 6.1})$$

Onde: X_1 = massa do carvão (g); X_2 = concentração do corante (mg/L).

A análise de variância (ANOVA) da absorvência das amostras de carvão ativado na adsorção de azul de metileno é apresentada na Tabela 6.11.

Tabela 6.11- ANOVA para absorvência 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
-------------------	--------------------	--------------------	----------------	-------------	---------

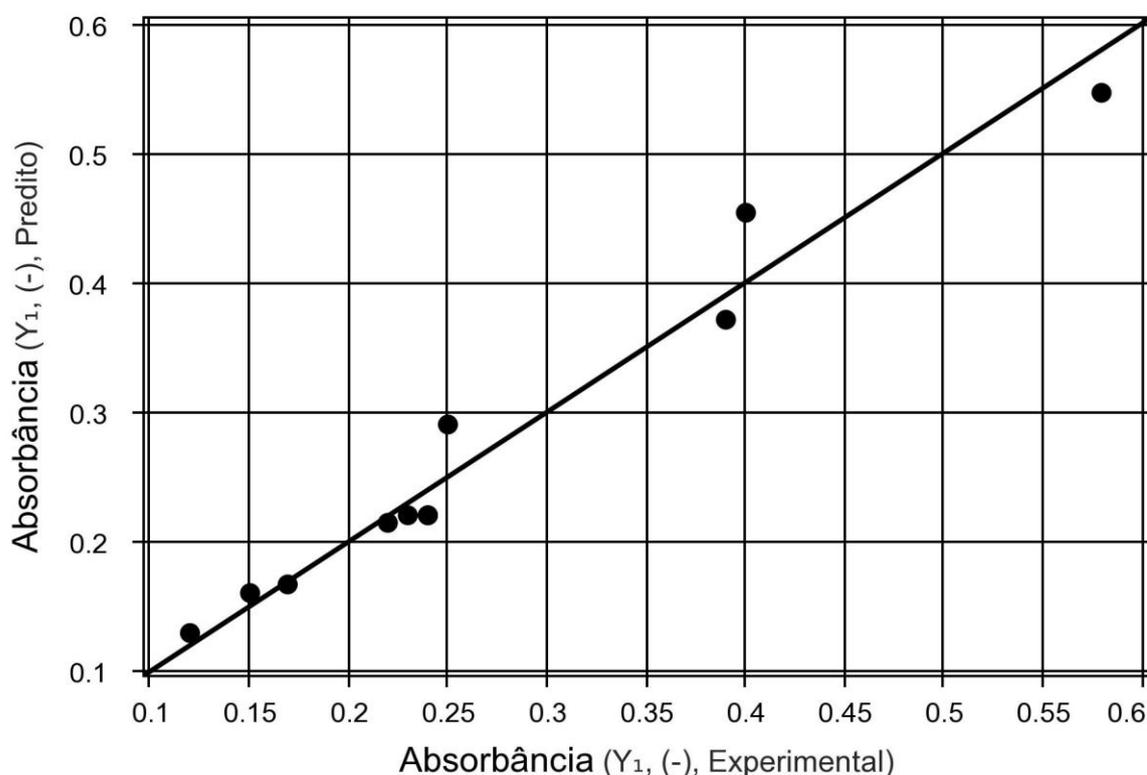
Regressão	0,02	5	0,0	24,4	0,00160
Resíduos	0,00	5	0,0		
Falta de ajuste	0,00	3	0,0	70,4	0,01403
Erro puro	0,00	2	0,0		
Total	0,02	10			

$R^2 = 96,06\%$

Fonte: AUTORA (2021)

Com o modelo linear ajustado, observa-se que o coeficiente de regressão (R^2) alcançado foi de 0,9606, indicando um bom ajuste do modelo aos dados. Graficamente representada, a Figura 6.8 comprova que houve uma pequena diferença entre os valores observados e os valores previstos do modelo, confirmado pelo agrupamento de pontos próximo a linha representativa.

Figura 6.8- Valores observados X Valores previstos para absorvância do carvão da CCC



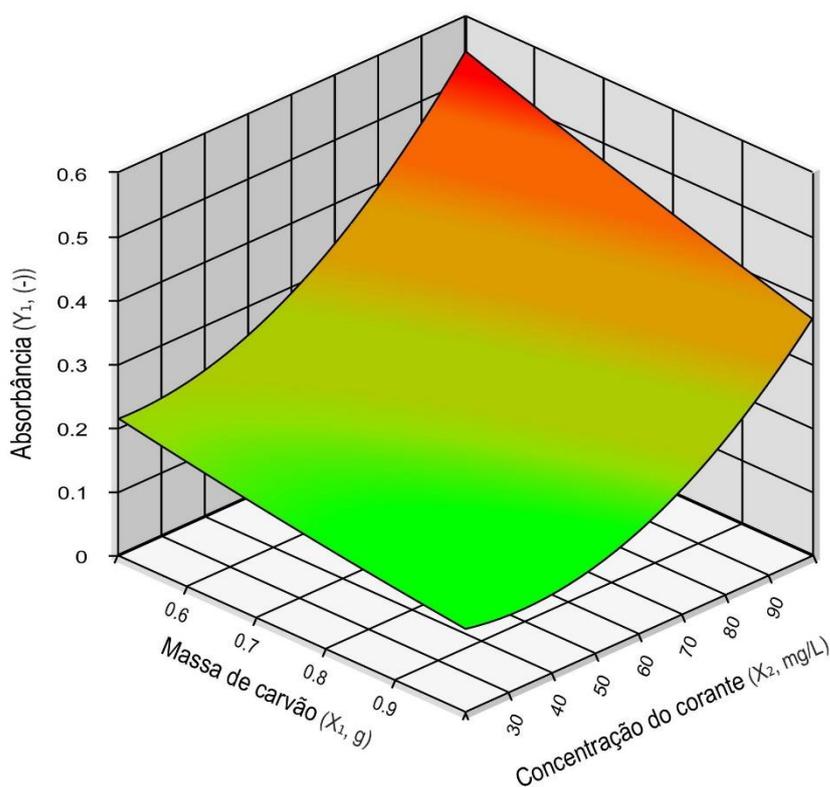
Fonte: AUTORA (2021)

A divisão entre os quadrados médios e os quadrados residuais do modelo permitiu conhecer o valor de f-calculado. O valor de Fcalculado foi determinado pela expressão, $F_{calculado} = \text{Quadrado médio regressão} / \text{Quadrado médio erro}$. Comparando o valor de Fcalculado

(24,4) para a regressão com o valor de F_{tabelado} ($F_{\text{tabelado}} = 5,05$), verifica-se uma regressão significativa.

O gráfico de superfície exposto e curvas de contorno gerado por meio do planejamento experimental é apresentado na Figura 6.9. Nota-se na que a capacidade de absorbância foi alcançada em condições de baixa quantidade de massa carvão e alta concentração de corante, como mostra as regiões destacadas em vermelho.

Figura 6.9- Superfície de resposta para absorbância do teste de adsorção com utilização do carvão ativado da CCC.



Fonte: AUTORA (2021)

6.4.2 Capacidade Máxima de Adsorção (Q)

O grau de capacidade máxima de adsorção de um carvão ativado indica eficiência deste carvão nas condições em que este foi submetido. A Tabela 6.12 traz os dados resultantes da interação entre as variáveis deste estudo para o resultado de capacidade máxima de adsorção do carvão ativado originário da pirolise da casca de castanha de caju.

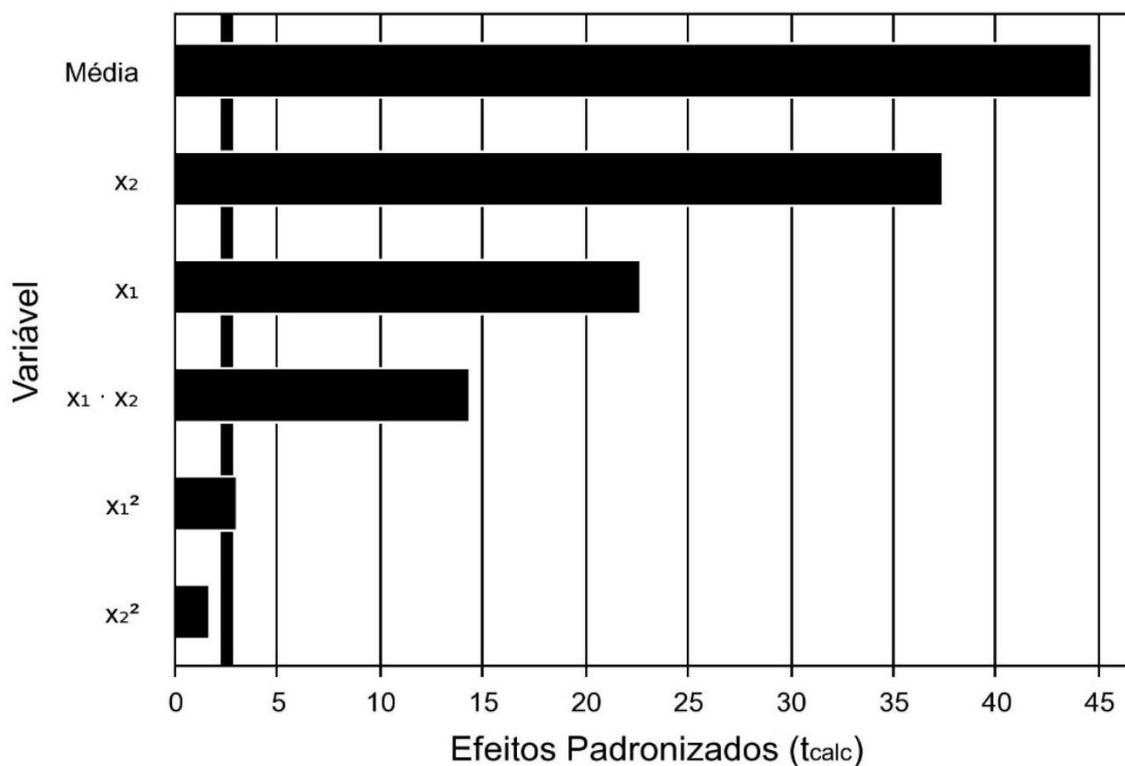
Tabela 6.12- Coeficientes de regressão do Planejamento DFC para definição da capacidade máxima de adsorção do carvão ativado da CCC

Fatores	Coeficiente de Regressão	Erro Padrão	t-calculado	p-valor
Média	2,38	0,05	44,60	0,0000
X_1	-0,97	0,04	-22,75	0,0000
X_1^2	0,20	0,07	3,01	0,0297
X_2	1,59	0,04	3,37	0,000
X_2^2	-0,11	0,07	-1,74	0,1428
$X_1 - X_2$	-0,75	0,05	14,34	0,000

Fonte: AUTORA (2021)

O gráfico de Pareto representado pela Figura 6.10 demonstra o efeito significativo das variáveis massa do carvão(X_1) e concentração do corante(X_2) atribuído a capacidade de adsorção do biocarvão, demonstrando que tais variáveis predictoras influenciam consideravelmente esta capacidade neste resultado.

Figura 6.10- Gráfico de Pareto da Capacidade Máxima de Adsorção (Q) do carvão da CCC



Fonte: AUTORA (2021)

No resultado da capacidade máxima de adsorção(Q), a massa do carvão (-0,97) em estudo indicou uma adição significativa para o modelo por apresentar um baixo p-valor correspondente a 0,0000, bem como a concentração do corante (-0,11) associada ao seu p-valor (0,0000) também baixo.

De acordo com a Equação 6.2 gerada pela análise de regressão, esta é aqui apresentada:

$$Q = 2,38 - 0,97 X_1 + 0,20 X_1^2 + 1,59 X_2 + 0,11 X_2^2 - 0,75 X_1 X_2 \text{ (Eq. 6.2)}$$

Onde: X_1 = massa do carvão; X_2 = concentração do corante.

A Tabela 6.13 demonstra a análise de variância (ANOVA) da capacidade máxima de adsorção(Q) amostras de carvão ativado da CCC na utilização do corante azul de metileno.

Tabela 6.13- ANOVA para capacidade máxima de adsorção da absorbância 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	23,0	5	4,6	425,9	0,00000
Resíduos	0,1	5	0,0		
Falta de ajuste	0,1	3	0,0	539,1	0,00185
Erro puro	0,0	2	0,0		
Total	23,0	10			

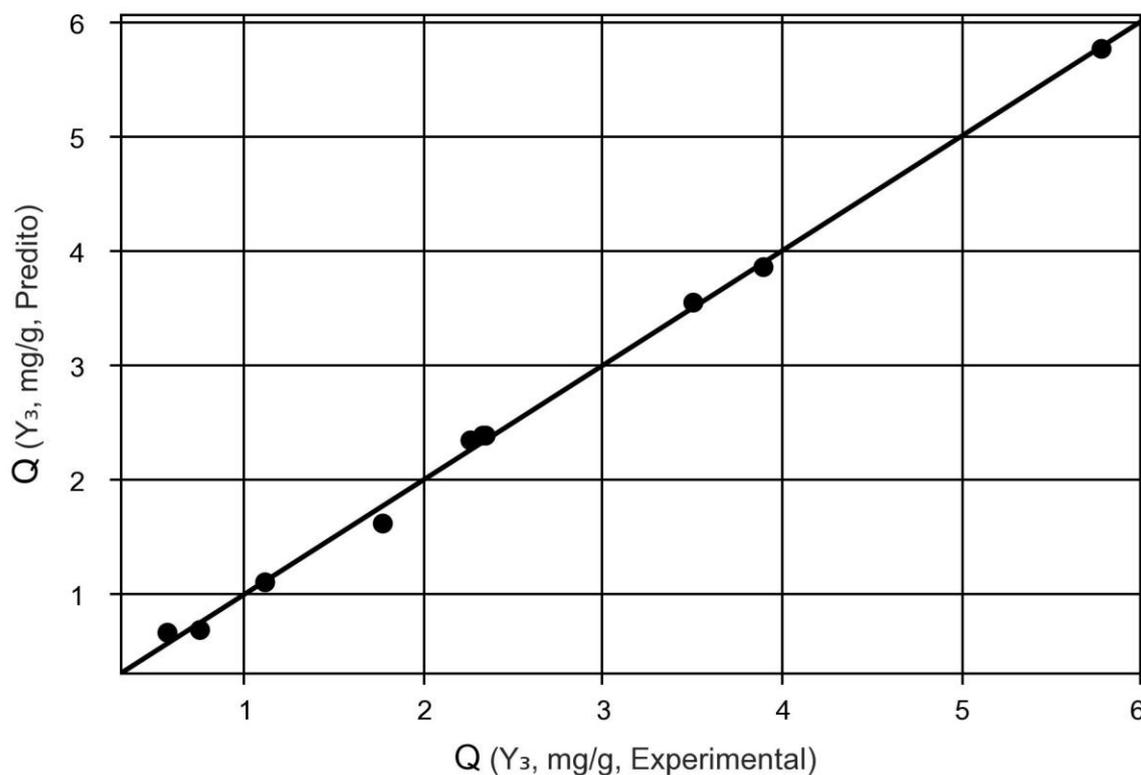
$R^2 = 96,06\%$

Fonte: AUTORA (2021)

Para a capacidade máxima de adsorção do carvão desta pesquisa, o valor de F_{calc} (425,9) para a regressão é maior que o valor de F_{tab} ($F_{tab} = 5,05$). Apontando que para a ANOVA, tem elevada significância sobre a precisão do método.

A Figura 6.11. mostra os valores analisados em comparação aos os valores pressupostos para o teste de adsorção do índice de azul de metileno.

Figura 6.11- Valores analisados versus os valores pressupostos da capacidade máxima de adsorção do carvão

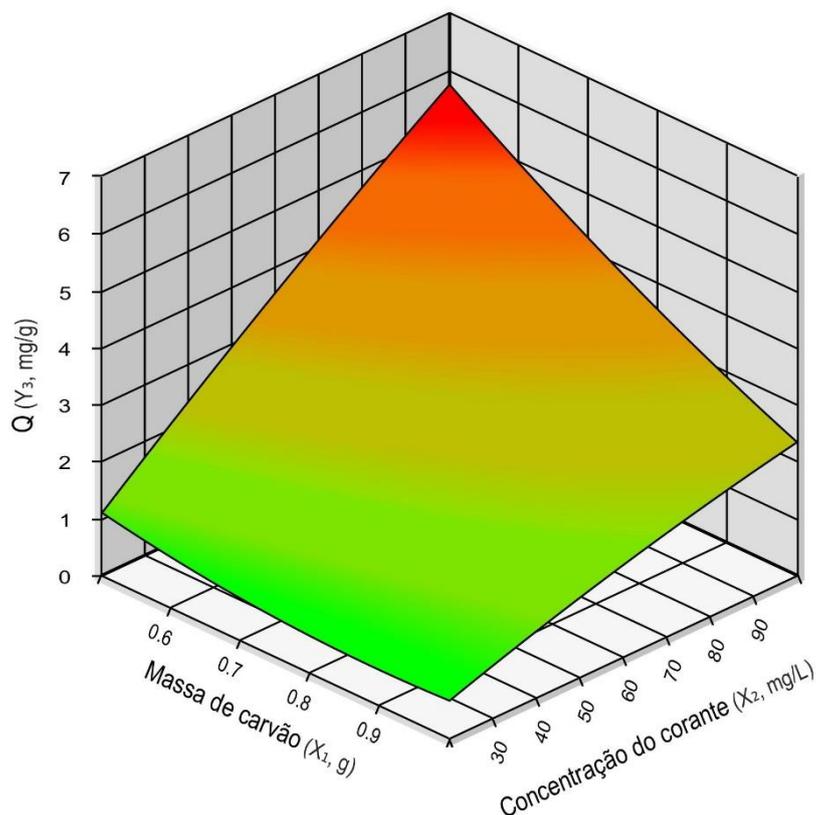


Fonte: AUTORA (2021)

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 superfície de resposta (Figura 6.12), verifica-se que a capacidade máxima de adsorção do carvão ativado da CCC foi obtida em circunstâncias de baixa quantidade de massa carvão e alta concentração de corante, conforme a região ilustrada em vermelho.

Figura 6.12- Gráfico de superfícies que representa a capacidade máxima de adsorção do carvão desta pesquisa



Fonte: AUTORA (2021)

6.5 Teste de adsorção de água cinza em filtro de carvão da Casca de Castanha de Caju

Na adsorção da água cinza em carvão ativado foi realizado preliminarmente o tratamento de decantação (coagulação/floculação) desta. Sequencialmente ocorreu a filtração empregando o filtro de areia e o filtro de carvão da casca de castanha de caju.

6.5.1 Caracterização da água cinza bruta

Na Tabela 6.14 é apresentado a caracterização da água cinza bruta utilizada no ensaio de coagulação/floculação no equipamento Jar-Test, onde observam-se altos valores dos parâmetros analíticos turbidez e sólidos totais.

Tabela 6.14- Características da água cinza bruta

Variável Analítica	Água cinza bruta desta pesquisa	Outros autores	
		Pedroza et al., (2021)	Rodrigues (2019)
pH (-)*	9,1	9,8	7,9
Turbidez (uT)	110	170	70,5
Sólidos Totais (mg/L)	1090	2340	3401
Sólidos Fixos (mg/L)	747	1690	1094
Sólidos Voláteis (mg/L)	343	650	2387

Fonte: AUTORA (2020)

O resultado do pH da água cinza bruta desta pesquisa apresenta um valor próximo ao encontrado por Pedroza et al., (2021) e superior ao encontrado por Rodrigues (2019). Já os parâmetros de turbidez, sólidos totais, sólidos fixos e sólidos voláteis em comparativo com os autores, apesar de apresentar uma variação nos resultados, ainda sim se encontram elevados, justificando a necessidade de tratamento.

6.5.2 Teste de Coagulação/Floculação com Sulfato de Alumínio

Para a realização do ensaio de coagulação/floculação foi utilizado 2 amostras de água cinza. O coagulante empregado neste estudo foi o Sulfato de alumínio, aplicado em 3 dosagens diferentes em 3 recipientes de água cinza, respectivamente.

De acordo com Fernandes et. al (2010), o Sulfato de alumínio demonstra maiores remoções de turbidez, quando os valores de pH estão próximos da neutralidade. Logo, antes da coagulação/floculação efetuou-se com o sulfato clorídrico a correção do pH em cada uma das amostras de água cinza, antes de 9,20 para 7,9. Com a correção do pH, observa-se na Tabela 6.15 que a dosagem de 50mL foi a que resultou na maior remoção de turbidez (de 110 uT para 6,57 uT).

Tabela 6.15- Resultado do Parâmetro de Turbidez (uT) da água cinza com a dosagem do sulfato de alumínio

ÁGUA CINZA (200L)	Variável Analítica	Dosagens de Sulfato de Alumínio		
		30mL	50mL	70mL
Amostra 01	Turbidez (uT)	57,5	6,57	9,24
Amostra 02	Turbidez (uT)	-	11,9	11,9

Fonte: AUTORA (2021)

6.5.3 Eficiência do carvão ativado da casca de castanha de caju para filtração de águas cinzas

Os resultados alcançados no processo de polimento de águas cinzas mediante a filtração com a utilização do carvão da casca da castanha de caju, gerado por meio do processo de pirólise, são apresentados na Tabela 6.16.

Tabela 6.16- Dados obtidos do processo de polimento de águas cinzas através do sistema de filtração com emprego do carvão ativado da casca de castanha de caju.

PARÂMETRO	Resultados		
	Água cinza bruta	Água cinza decantada	Água cinza após coluna de filtração com carvão ativado
Temperatura (°C)	25	25,1	24,8
pH (-)*	7,9	6,1	6,0
DQO (mg/L)	290	255	41
Condutividade (uS/cm)	770	795	765
Sólidos Totais (mg/L)	1090	-	749
Sólidos Fixos (mg/L)	747	-	699
Sólidos Voláteis (mg/L)	343	-	50
Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)	135	61	49
Turbidez (uT)	110	5	0,8
Cloretos (mg/L)	117	105	101
Ortofosfato solúvel (mgP/L)	0,2	ND	ND
Cloro Residual (mg/L)	0,2	0,15	ND
Amônia (mgN/L)	0,5	0,4	ND
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	ND	ND	ND
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	ND	ND	ND

*Valor de pH após correção

ND= Nada Encontrado

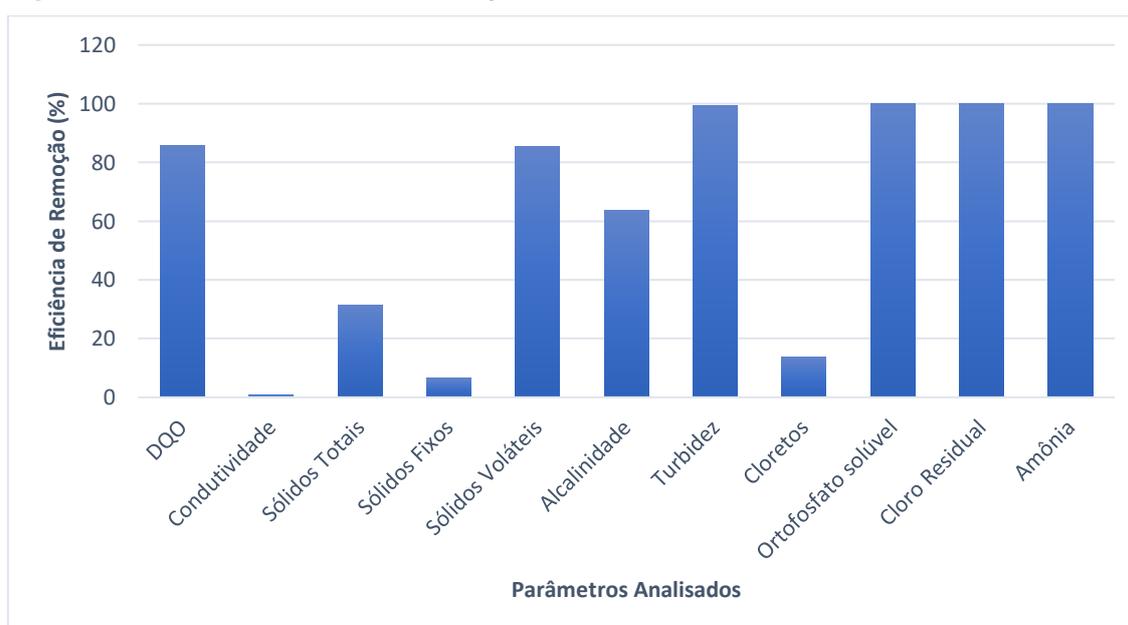
Fonte: AUTORA (2020)

Ao analisar os parâmetros de controle obtidos por meio do processo de filtração com a utilização do carvão ativado oriundo da degradação térmica da casca de castanha de caju,

nota-se o grau de eficiência de cada um. A Figura 6.12 explana o gráfico de eficiência de remoção do filtro utilizado no teste de adsorção.

Com remoção total, os parâmetros que atingiram esta eficiência foram: ortofosfato solúvel; cloro residual e amônia. Os resultados para DQO, sólidos voláteis, turbidez e alcalinidade apresentam um percentual considerável de eficiência de remoção, sendo estes, 85.86, 85.42, 99.27 e 63.7 %, respectivamente. E os parâmetros que em menor porcentagem apresentaram menor eficiência de remoção foram: condutividade, sólidos fixos, sólidos totais e cloretos, com 0.64, 6.42, 31.28 e 13.67 %, nesta ordem.

Figura 6.13- Gráfico de Eficiência de Remoção



Fonte: AUTORA (2020)

A turbidez é um parâmetro operacional significativo, pois reflete a eficiência dos processos de separação sólido-líquido e que o menor valor de turbidez, indica maior efetividade das barreiras do tratamento (FERNANDES, 2010). Logo, com a remoção de turbidez superior a 95%, o tratamento de águas cinzas se manifesta eficiente.

Os parâmetros de condutividade, sólidos fixos, sólidos totais e cloretos presentes na água cinza obtiveram no método de polimento aplicado neste estudo uma baixa remoção. De acordo com Pedroza et al., (2021), esta baixa remoção está relacionada à baixa capacidade de retenção de íons inorgânicos, abundantes nas amostras de águas cinzas, especialmente sódio.

Com a correção do pH da água cinza bruta para 7,9, a água cinza tratada, ou seja, após a filtração, passou a apresentar um pH mais próximo da neutralidade, sendo este 6,0. A temperatura desta, também teve uma baixa redução após o tratamento (de 25°C para 24,8°C).

A NBR13969:1997 define as classificações e respectivos valores de parâmetros para esgotos, conforme o reúso para fins de utilização de água não potável:

- **Classe 1:** Lavagem de carros e outros usos que requerem o contato direto do usuário com a água, com possível aspiração de aerossóis pelo operador, incluindo chafarizes: turbidez inferior a cinco, coliforme fecal inferior a 200 NMP/100 mL; sólidos dissolvidos totais inferior a 200 mg/L; pH entre 6,0 e 8,0; cloro residual entre 0,5 mg/L e 1,5 mg/L.
- **Classe 2:** lavagens de pisos, calçadas e irrigação dos jardins, manutenção dos lagos e canais para fins paisagísticos, exceto chafarizes: turbidez inferior a cinco, coliforme fecal inferior a 500 NMP/100 mL, cloro residual superior a 0,5 mg/L.
- **Classe 3:** reúso nas descargas dos vasos sanitários: turbidez inferior a 10, coliformes fecais inferiores a 500 NMP/100 mL.
- **Classe 4:** reúso nos pomares, cereais, forragens, pastagens para gados e outros cultivos através de escoamento superficial ou por sistema de irrigação pontual. Coliforme fecal inferior a 5 000 NMP/100 mL e oxigênio dissolvido acima de 2,0 mg/L.

Desse modo, a água cinza tratada nesta pesquisa por meio do ensaio de adsorção em filtro de carvão ativado da casca de castanha de caju, enquadra-se como de classe 3. É relevante destacar, que apesar dos parâmetros de Coliformes Fecais atenderem o nível desejado para enquadramento deste reúso na Classe 4, não foi analisado neste estudo o parâmetro de oxigênio dissolvido. Com isso, não é possível categorizar o efluente nesta classe, ficando esta, uma sugestão para análises futuras.

7. CONCLUSÃO

Baseado nos resultados obtidos com esta pesquisa por meio de diferentes etapas (caracterização da biomassa, delineamento experimental, caracterização do subproduto gerado através do processo de pirólise e tratamento de águas cinzas), podemos concluir que:

O alto teor de material volátil e o baixo teor de umidade da biomassa em estudo, mostra que está se encontra adequada para o processo de pirólise.

O processo de degradação térmica da casca de castanha de caju realizado em diferentes circunstâncias possibilitou alcançar rendimentos na fase líquida, sólida e gasosa. Com temperatura de 500°C e taxa de aquecimento de 20°C/min, o rendimento em massa do carvão variou de 33,10% a 36,10%, o que indica um rendimento favorável aos valores definidos para as variáveis do ponto central no planejamento experimental.

O aumento da temperatura teve efeito negativo ao rendimento do carvão, que diminuía ao longo do processo. Logo, esta variável apresenta um importante indicativo para a composição e capacidade de produção dos subprodutos obtidos por intermédio da pirólise.

Em relação a caracterização da fase sólida (biocarvão) gerada no processo, este apresenta alto poder calorífico, pois a alta concentração de carbono e hidrogênio presente na biomassa implica no aumento desta propriedade.

Consoante aos resultados obtidos do teste de adsorção de índice de azul de metileno com a utilização do carvão ativado oriundo da pirólise da casca de castanha de caju em amostras de águas cinzas, o experimento mostrou que com quantidade baixa de massa e alta concentração de corante azul de metileno a capacidade de adsorção deste carvão se torna mais eficiente.

Constatou-se que o coagulante sulfato de alumínio no estágio de coagulação/floculação/decantação da amostra de água cinza foi capaz de remover a turbidez após a correção do pH desta a um nível de 95% de remoção, utilizando a dosagem intermediária(50mL) do método.

Conclui-se que o tratamento de águas cinza nas etapas de coagulação/floculação e filtro de areia e filtro de carvão da casca de castanha de caju, se apresenta apropriado, removendo sólidos sedimentáveis, voláteis; turbidez; e coliformes totais em valores percentuais superiores a 80%.

REFERÊNCIAS

ASTM D 3173-85 - **Standard Test of Humidity**. (1985).

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13969: taques sépticos: unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – projeto, construção e operação**. Rio de Janeiro, 1997.

ALMEIDA, M. B. de. **Bio-óleo a partir da pirólise rápida, térmica ou catalítica, da palha da cana-de-açúcar e seu co-processamento com gásóleo em craqueamento catalítico**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2008. Dissertação. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 2002. 153p.

ANJOS, D. B. dos, RIBEIRO, C. F., NUNES, T. A., SILVA, J. da. **Potencial da casca de castanha de caju do Brasil como biofertilizante no cultivo de *Lactuca sativa L.*** South American Journal of basic education, Technical and Technological. Vol. 4, n. 1, p. 193-199, 2017.

ANTUNES, F. J. A. **Produção de combustíveis e de energia elétrica a partir da biomassa lenhocelulósica**. 2008. 49 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade do Porto, Porto, 2008.

APAYDIN-VAROLL, e; PUTUN. (2007) A. E. **Slow pyrolysis of pistachio shell** . Fuel, v. 86, p. 1892-1899.

BNB- Banco do Nordeste do Brasil. **Estudo da cadeia produtiva do caju e validação de metodologia para acompanhamento dos sistemas agroindustriais/Banco do Nordeste do Brasil**. Fortaleza: Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura: Banco do Nordeste do Brasil, 2009.

BRANDÃO, V. S.; MATOS, A. T.; FONTES, M. P. F.; MARTINEZ, M. A. **Retenção de poluentes em filtros orgânicos operando com águas residuárias da suinocultura**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 329- 334, 2003.

BRAINER M. S. de C. P. ;VIDAL M. de F. Cajucultura Nordestina em recuperação. Caderno Setorial- ETENE. Ano 3, nº 54, novembro, 2018. Disponível em < https://www.bnb.gov.br/documents/80223/4141162/54_caju.pdf/95e65093-50e1-b48d-ab01-15f3a8f690b4 > Acesso em 20 de julho de 2017.

BAZZARELLA, B.B. **Caracterização e aproveitamento de água cinza para uso não-potável em edificações**. 2005. 165 f. Dissertação (mestrado em Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico). Vitória, 2005.

BEZERRA D. P.; FREITAS G. V. V. de. **Casca da castanha de caju como precursor na síntese de carbono ativado para purificação de efluentes industriais contaminados com corantes orgânicos**. 65ª Reunião Anual da SBPC, julho de 2013-UFPE, Recife (PE). Disponível em <<http://www.sbpcnet.org.br/livro/65ra/resumos/resumos/4834.htm> > Acesso em 23 de março de 2020

BRASIL, 2002. **Conselho Nacional do meio ambiente (CONAMA)**. Resolução nº 312, 29 de outubro de 2002. Diário oficial da união, Brasília. Universidade de Ribeirão Preto, UNAERP, Tecnologia Ambiental. Ribeirão Preto, 2019.

BRAGA, R. da S. **Desenvolvimento de filme polimérico à base de hemicelulose extraída do bagaço de cana-de-açúcar**. Caxias do Sul-RS, 2018. 47 p. Monografia (Engenharia Química)- Universidade de Caxias do Sul.

BIAZUS, A. C. **Reúso de águas cinzas para fins não potáveis em edificação residencial multifamiliar**. Monografia (Graduação). Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo- RS, 2015.

BISCOLA, T. A. Influência das condições de aplicação do carvão ativado pulverizado na eficiência de remoção de azul de metileno no tratamento em ciclo completo. Ribeirão Preto, 2019. 112 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental)- Universidade de Ribeirão Preto.

BRIDGWATER, A.V. (2012) **Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading.**

A composição da biomassa apresenta principalmente celulose, hemicelulose e lignina. Hemiceluloses são polissacarídeos de parede celular presentes nas células vegetais e mais suscetíveis à hidrólise quando comparados à celulose, uma vez que apresentam menor grau de polimerização Biomass Bioenergy, v. 38, p. 68-94.

BRIDGWATER, A. V.; MEIER, D.; RADLEIN, D. (1999) **An overview of fast pyrolysis of biomass.** Organic Geochemistry , 30 (12), p. 1479 – 1493.

BUTTON S. T. **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados.**

Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. São Paulo, Campinas (2012)

Disponível em <<http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/pos-graduacao/IM317/apostila2012.pdf>> Acesso em 07 de abril de 2020

COELHO, Gustavo Ferreira. **Utilização da casca da castanha de caju *Anarcadium occidentale L.* como biossorvente de metais.** 2014. 138 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2014.

CONAB- Companhia Nacional de Abastecimento. **Análise Mensal da Produção da**

Castanha de Caju. Brasília-DF (2019) Disponível em <https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuário-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-castanha-de-caju/item/download/28638_7c8df6b911d06c7012e848947b09d48d> Acesso em 07 de abril de 2020

CORTON, J. **Expanding the biomass resource: sustainable oil production via fast pyrolysis of low input high diversity biomass and the potential integration of thermochemical and biological conversion routes.** Applied Energy: 177, p. 852-862, 2016.

COSTA, T. G. **Propriedades da madeira de espécies do Cerrado Mineiro e sua**

potencialidade para geração de energia. 2011. 76 f. Dissertação (Mestrado - área de concentração em Processamento e Utilização da Madeira), Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

DAS, P.; GANESH, A. (2003) **Bio-oil from pyrolysis of cashew nut shell - a near fuel.** Biomass and Bioenergy, v.25, p. 113-117.

DALPAZ L. ; BORGET A. E.; VENDRAMI J. M.; GHISI E. **Tipos e eficiência de unidades de tratamento para água pluvial: revisão de literatura.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 19, n. 3, p. 207-231, jul./set. 2019.

DEMIRBAS, A.; ARIN, G. (2002) **An overview of biomass pyrolysis.** Energy Sources, v. 24, p. 471-482.

ERIKSSON, E. et al., 2001. **Characteristics of grey wastewater.** Urban Water 4 (2002) 85-104

FRANÇA, A. R. M. ; NUNES E. M. Castanha de Caju: o ouro de Serra do Mel no Sertão Brasileiro. Disponível em <<http://fidamercosur.org/claeh/experiencias/experiencias-en-la-regi%C3%B3n/979-castanha-de-caju-o-ouro-de-serra-do-mel-no-sert%C3%A3o-brasileiro>> Acesso em 01 de abril de 2020

FRASSOLDATI, A.; MIGLAVACCA, G.; CRIPPA, T.; VELATA, F.; FARAVELLI, T.; RANZI, E. (2006) **Detailed Kinetic Modeling of Thermal Degradation of Biomasses.** 29th Meeting on Combustion, Napoli, Italia.

FIGUEIREDO, F. A. B. **Pirólise e Gaseificação de Casca de Castanha de Caju: Avaliação da Produção de Gás, Líquidos e Sólidos.** UNICAMP, 2009.

FIGUEIREDO, A.R. (2011) **Caracterização dos Produtos da Pirólise da Casca de Castanha de Caju: Influência da Taxa de Aquecimento e da Temperatura.** Engenharia Mecânica)- Universidade Estadual de Campinas. São Paulo, p. 7. Tese (doutorado)

FIORI, S; FERNANDES, V.M.C; PIZZO, H. **Avaliação qualitativa e quantitativa do reúso de águas cinzas em edificações.** Ambiente Construído, v. 6, p. 19–30, 2006.

FERNANDES, N. M. G. et al. **Influência do pH de coagulação e da dose de sulfato de alumínio na remoção de oocistos de *Cryptosporidium* por filtração direta descendente.** Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 15, p. 375–384, 2010.

FERNANDES, R.; BRESAOLA JUNIOR, R.. Remoção de 17 α -etinilestradiol de águas para abastecimento, utilizando diferentes tecnologias de tratamento físicoquímico. Revista DAE, Campinas-SP, 2011. Disponível em: <http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_187_n_1463.pdf> Acesso em 28 de abril de 2020

GARCÍA, R.; *et al.* Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. **Bioresource Technology**: 103, p. 249-258, 2012.

GUANZIROLI, C. E.; SOUZA FILHO, H. M.; VALENTE JUNIOR, A. S. **Estudo da cadeia produtiva do caju.** Estudo das relações de mercado. Banco do Nordeste do Brasil- Fortaleza: Instituto Interamericano de Cooperação para Agricultura: Banco do Nordeste do Brasil, 2009. 152 p.

GUERRA, J. F. **Remoção do herbicida 2,4 diclorofenoxiacético (2,4-D) no tratamento convencional de água e associado à adsorção em carvão ativado em pó (CAP) em escala piloto.** 2014. 128p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2014.

GOODMAN, L. J.; LOVE, R. N. (1981) **Biomass energy projects: Planning and management.** Pergamon Press, p. 1 – 13.

HILL, C. G. Jr., **An Introduction to Chemical Engineering Kinetics & Reactor Design,** John Wiley & Sons, New York, 1977.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento sistemático da Produção Agrícola.** IBGE/LSPA. Série 2012,2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistematico-da-producao-agricola.html?=&t=o-que-e> Acesso em julho de 2019

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística **Em abril, IBGE prevê alta de 2,2% na safra de grãos de 2019**. Agência IBGE Notícias, 09 de maio de 2019. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/24363-em-abril-ibge-preve-alta-de-2-2-na-safra-de-graos-de-2019>> Acesso em junho de 2019.

INGUANZO, M. et al. **On the pyrolysis of sewage sludge: the influence of pyrolysis conditions on solid, liquid and gases fractions**. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, p. 209–222, 2002.

IRIAS, L. J. M.; GLEBER, L.; PALHARES, J. C. P.; ROSA, M. F.; RODRIGUES, G. S. Avaliação de impacto ambiental de inovação tecnológica agropecuária- aplicação do sistema Ambitec. **Agricultura em São Paulo**, São Paulo vol. 52, n. 1, p. 23-39, jun. 2004.

IPT. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Manual para aproveitamento águas cinza do banho. 32P, 2016.

JEFFERSON, B., LAINE, A., PARSONS, S., STEPHENSON, T. & JUDD, S., 2000. Technologies for domestic wastewater recycling. Urban Water, 285-292.

KIMURA, L. M. **Uma contribuição à pirólise de biomassa: avaliação de alguns resíduos da agroindústria como fonte de energia alternativa**. UFU, 2009.

KIRUTHIKA, R.; UBRAMANIAN, P.; RAJIVGANDHI, M. M. C. (2013) **Bio oil Production from various Agro Residues through Pyrolysis**. International Journal of Engineering Research & Technology, v. 2, n. 9, p. 1678-1681.

KIM, Y.; PARKER, W. **A technical and economic evaluation of the pyrolysis of sewage sludge for the production of bio-oil**. Bioresource Technology, p. 1409–1416, 2008.

LEAL, W.P.. Remoção do Ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) por Adsorção em Carvão Ativado Pulverizado Associado ao Tratamento Convencional de Água para Consumo Humano. 2013. 154p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2013

LEIGNER C. **O uso de carvão no processo de tratamento de água.** Revista TAE (2012) Disponível em <<http://www.revistatae.com.br/4922-noticias> > Acesso em 23 de março de 2020.

LEITÃO, N. C. M.; PRADO, G. H. C.; VEGGI, P. C.; MEIRELES, M. A. A.; PEREIRA, C. G. **Anacardium Occidentale L. leaves extraction via SFE: Global yields, extraction kinetics, mathematical modeling and economic evaluation.** The Journal of supercritical fluids, v. 78, p. 114-123, 2013.

LEITE, L. A. S. Agroindústria do caju: **Políticas públicas e transformações econômicas.** Fortaleza: EMPRAPA-CNPAT, 1994 195 p.

LIMA, J. R., PINTO, G. A. S., MAGALHÃES H. C. S. Óleo da Amêndoa de Castanha-de-Caju Métodos de Extração. Boletim de pesquisa e desenvolvimento - Embrapa Agroindústria Tropical, ISSN 1679-6543; 165, Fortaleza-CE, 2018.

LORA, E. S. **Tecnologia e Aplicação Racional de Energia Elétrica e de Fontes Renováveis na Agricultura.** In: XXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, p.97-128, Campina Grande, 1997.

LIM, J. S. et al. **A review on utilisation of biomass from rice industry as a source of renewable energy.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, n. 5, p. 3084–3094, 2012.

LIMA, S. A.. (2008) **Análise da viabilidade do uso de cinzas agroindustriais em matrizes cimentícias: estudo de caso da cinza da casca da castanha de caju.** Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 139 . Dissertação (Mestrado).

LÓPEZ-MARCOS, M. C.; BAILINA, C.; VIUDA-MARTOS, M.; PÉREZ-ALVAREZ, J. A.; FERNÁNDEZ-LÓPEZ, J. Propriedades das Fibras Alimentares Agroindustriais Coprodutos como fonte de alimentos enriquecidos com fibras. Food Bioprocess Technology, v.8, n.12, p. 2400–2408, 2015.

LORENZI, H.; MATOS, F. J. A. (2002) **Plantas Medicinais no Brasil: nativas e exóticas**. São Paulo: Nova Odessa. Mazzetto, S. E.; Lomonaco, D.; Mele, G. (2009) Óleo da castanha de caju: oportunidades e desafios no contexto do desenvolvimento e sustentabilidade industrial. *Química Nova*, v. 32, n. 3, p. 732-741.

LV, P.M.; XIONG, Z. H.; CHANG, J.; WU, C.Z.; CHEN, Y.; ZHU, J.X. **An experimental study on biomass air–steam gasification in a fluidized bed**. *Bioresources Technology*, v. 95, p. 95-101, 2004.

MARMO, C. R.; SANTOS, B. V. A. P.; JÚNIOR, R.B.. Remoção de trihalometanos (THM) em águas de abastecimento por tratamento convencional e adsorção em carvão ativado em pó (CAP). *Revista DAE*, p. 19-25, 2010. Disponível em: <http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_182_n_1461.pdf>. Acesso em 28 de abril de 2020.

MARQUES, A. **Utilização Energética da Biomassa em Portugal - Caso de estudo da Tratolixo**. 2015. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial), Técnico Lisboa, Lisboa, Portugal, 2015.

MASCHIO, G.; KOUFOPANOS, C.; LUCCHESI, A. **Pyrolysis, a promising route for biomass utilization**. *Bioresource Technology*. v.42, p. 219-241, 1992.

MAZZETTO S. E; LOMONACO D. **Óleo da castanha de caju: oportunidades e desafios no contexto do desenvolvimento e sustentabilidade industrial** *Rev Quim. Nova*, Vol. 32, Nº. 3, 732-741, 2009.

MELZER, M.; BLINA, J.; BENSAXHRIAC, A.; VALETTELB, J.; BROUSTB, F. (2013) **Pyrolysis of extractive rich agroindustrial residues**. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v.104, p. 448-460.

MIRANDA, G. P. **Modelagem e simulação de reatores em leito fluidizado para gaseificação da biomassa**. Dissertação (mestrado) Programa de Engenharia Química- Universidade Federal do Rio de Janeiro (2014)

MOREIRA R. **Estudo da pirólise lenta da casca da castanha de caju**. Dissertação (mestrado) em Programa de Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais, Instituto de Pesquisas energéticas e nucleares, São Paulo (2015)

MORAIS, M. R. et al. Obtenção De Briquetes De Carvão Vegetal De Cascas De Arroz Utilizando Baixa Pressão De Compactação. Encontro de Energia no Meio Rural, v. 6, 2006.

MORAIS E. R. Modelagem e simulação de reatores catalíticos de leito fixo: avaliação de diferentes configurações para o fluido refrigerante. Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química -Campinas, SP: [s.n.], 2004.

OLIVEIRA, V. H. de. **Cashew crop**. Revista Brasileira Fruticultura. Vol. 30, n. 01, p. 0-0, 2008.

OLIVEIRA, C. P. M de; PIMENTA, G. H. A.; SILVA, M. R.; RAMOS, M. M. M.; SIQUEIRA, M. de C.; FONSECA, Y, A. DE. **Extração da lignina presente no licor negro para adsorção de íons de metais pesados**. Rev. Percurso Acadêmico, Belo Horizonte, v. 7, n. 14, jul./dez. 2017.

PATELI, R.N.; BANDYOPADHYAY, S.; GANESH, A. (2011) **Extraction of cardanol and phenol from bio-oils obtained through vacuum pyrolysis of biomass using supercritical fluid extraction**. Energy, v. 36, n. 3, p. 1535-1542.

PASCHOALATO, C. F. P. R.; TRIMAILOVAS, M. R.; DI BERNARDO, L. **Formação de Subprodutos Orgânicos Halogenados nas Operações de Pré-oxidação com Cloro, Ozônio e Peroxônio e pós-cloração em Água Contendo Substância Húmica**. Revista Engenharia Sanitária Ambiental, v.13, n.3, p.313-322, jul./set 2008.

PEDROZA, M. M. **Bio-óleo e Biogás da degradação termoquímica de lodo de esgoto doméstico em cilindro rotativo**. 2011. 214 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal Do Rio Grande Do Norte, Natal, RN, 2011.

PEDROZA, M. M.; NEVES, L. H. D.; PAZ, E. C. S.; SILVA, F. M.; REZENDE, C. S. A.; COLEN, A. G. N.; ARRUDA M. G. **Activated charcoal production from tree pruning in**

the Amazon region of Brazil for the treatment of gray water. Journal of Applied Research and Technology, v.19, n.1, p. 49-65, fevereiro 2021.

PEREIRA JR., V.P. **Alternativas para a co-geração de energia em uma indústria de chapas de fibra de madeira.** 2001. 100 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

PELÁEZ- Samaniego. (2007) M.R. **Uso de biocombustível da pirólise rápida de palha de cana em um motor de ciclo Otto.** Universidade Estadual de Campinas, 2007. 100 p. Dissertação (Mestrado).

PINTO, G. A. S.; BRITO, E. S.; SILVA, F. L. H.; SANTOS, F. S. M.; MACEDO, G. R. **Fermentação em estado sólido; uma alternativa para o aproveitamento e valorização de resíduos agroindustriais.** Revista de Química Industrial, v. 74, n. 724, p.17-20, 2006.

QUIRINO E. C. G. Obtenção da farinha do penducúlo de caju e seu emprego na formulação de bolo rico em fibras. Monografia (graduação). Universidade Federal da Paraíba- João Pessoa, 2019.

RAMOS, J. E. T.; DUARTE, T. C.; RODRIGUES, A. . O.; SILVA, Jr. I. J.; CAVALCANTE, Jr. C. L.; AZEVEDO, D. C. S.; On the production of glucose and fructose syrups from cashew apple juice derivatives. Journal of Food Engineering, v.102, p. 355-360. 2011

RODRIGUES, C. R. **Degradação térmica da casca de arroz e utilização do carvão obtido no processo para polimento de águas cinzas.** Palmas- TO (2019). 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)- Universidade Federal do Tocantins

RODRIGUES. M. I; IEMMA. A. F. Planejamento de experimentos e otimização de processos. 3. ed. Editora Casa do Espírito Santo Fé e Amor. Campinas, São Paulo, 2014.

RAPOPORT, B. **Águas cinzas: caracterização, avaliação financeira e tratamento para reúso domiciliar e condominial.** Ministério da saúde – Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública. Rio de Janeiro, 85 f., 2004.

SAIT, H. H.; *et al.* Pyrolysis and combustion kinetics of date palm biomass using thermogravimetric analysis. **Bioresource Technology**: 118, p. 382-389, 2012.

SANCHEZ, M. E. *et al.* **Effect of pyrolysis temperature on the composition of the oils obtained from sewage sludge.** Biomass and Bioenergy, 2009.

SANCHEZ, E.M.S. (2010) **Alcatrão ou bioóleo: Caracterização, amostragem e utilização.** In: SÁNCHEZ, C.G. (Org.). Tecnologia da gaseificação de biomassa. Campinas: Editora Átomo, p. 353 – 385.

SANTANA E. de A. **Desenvolvimento de um sistema de filtragem para tratamento de água cinza visando o seu reúso.** Universidade Federal de Viçosa/ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Viçosa-MG, 2013. Dissertação (mestrado)

SANTOS, M. C. L., & GONÇALVES-DIAS, S. L. F. (2012). **Gestão de Resíduos na cidade de São Paulo: um problema, múltiplas soluções.** In B. R. Padovano, M. Namur, & P. B. Sala (Eds.), São Paulo: em busca da sustentabilidade (Vol. 1, pp. 146-159). São Paulo: EDUSP/PINI.

SANTOS, R. P.;SANTIAGO, A. A. X.; GADELHA, C. A. A.; CAJAZEIRAS; J. B.; CAVADA, B.S; MARTINS, D. T. M., BEZERRA, G. A; SANTOS, R. P.; FREIRE, A. V. N. (2007) **Production and characterization of the cashew (*Anacardium occidentale* L.) penduncle bagasse ashes.** Journal of Food Engineering. V. 79, p. 1432-1437.

SANTOS L. R. O.; SANTOS C. P. de S.; SANTOS R. C. dos; YAMAJI F. M. **Utilização da casca de castanha de caju como biocombustível sólido.** Anais I CONIMAS e III CONIDIS V. 1, 2019, ISSN 2526-11https://editorarealize.com.br/revistas/conidis/trabalhos/TRABALHO_EV074_MD4_SA6_I D1769_23102017223625.pdf 86X. Disponível em <https://editorarealize.com.br/revistas/conidis/trabalhos/TRABALHO_EV074_MD4_SA6_I D1769_23102017223625.pdf > Acesso em 23 de março de 2020

SERRANO L. A. L; PESSOA F. A. de P. **Aspectos econômicos da cultura do cajueiro.** Sistema de Produção da Embrapa, Embrapa Agroindústria Tropical, 2ª ed. ISSN 1678-8702, Julho de 2016. Disponível em <https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducao16_1galceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-2&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaoId=7705&p_r_p_-996514994_topicoId=10308> Acesso em 23 de março de 2020.

SEMACE - **Superintendência Estadual do Meio Ambiente. Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Industriais.** Fortaleza: SEMACE; MMA/FNMA, 2004.

SILVA, L. B. **Emprego de adsorventes oriundos da casca de arroz na remoção de cobre em efluentes aquosos.** 2013. 110 f. Dissertação (Mestrado em Química), Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2013.

SILVA, N. C.; FILHO, N.L.D.; BASTOS, A.C.; VIEIRA, E.G.; GARCIA, E.F.; SOARES, I.V.; PERUJO, S.D.. Remoção de antibióticos em meio aquoso usando carvão ativado preparado a partir da casca de coco da baía. *Revista Sociedade Brasileira de Química, Ilha Solteira-SP*, 2012. Disponível em: <<http://sec.s bq.org.br/cdrom/35ra/resumos/T1208-1.pdf>> Acesso em: 20 de abril 2020

SINGH, R.; KRISHNA, B. B.; MISHRA, G.; KUMAR, J.; BHASKAR, T. **Strategies for selection of thermo-chemical processes for the valorisation of biomass.** *Renewable Energy*, v. 98, p. 226-237, 2016.

SHEN, L., ZHANG, D. **Low-temperature pyrolysis of sewage sludge and putrescible garbage for fuel oil production.** *Energy & Fuel*, p. 809–815, 2004.

SOARES, C. et al. **Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto.** *Revista Árvore*, v. 38, p. 543-549, 2014.

MACHADO, P. R. S. **Prospecção de bioprodutos a partir da degradação termoquímica do sabugo de milho visando aplicação industrial.** Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental. Dissertação (mestrado). Palmas,TO, 2019.

VALÊNCIA, C. A. V. **Aplicação da adsorção em carvão ativado e outros materiais carbonosos no tratamento de águas contaminadas por pesticidas de uso agrícola.** 2007. 116p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

VIANA M. M. **Obtenção e utilização de produtos de pirólise do lodo de esgoto para adsorção de poluentes em meio aquoso.** São Paulo-SP. (2013). 219 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química)- Escola Politécnica de São Paulo.

VIEIRA, G. E. G. et al. **Low temperature conversion (LTC) – An alternative method to treat sludge generated in an industrial wastewater treatment station – Batch and continuous process comparison.** Bioresource Technology, v. 100, p. 1544–1547, 2009.

VOLTAN, P. E. N. **Remoção de diuron e hexazinona por meio de adsorção em carvão ativado, oxidação e tratamento em ciclo completo.** São Carlos 2014. 256p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos.

THÉVET, A.; **Singularidades da França Antártica.** Edusp: São Paulo, 1978.

TELLES D. D.; COSTA P. R. **Reúso da água: conceitos, teorias e práticas.** 2 ed. São Paulo: Blucher. 408. p., 2010.

TAVARES, B. G.; LINARDI, M.; SANTOS, I.; EGUTE, N. dos S.; ORSINI, R. dos R.; CARVALHO, F. M. S. **Estudo do potencial da casca de castanha de caju para a obtenção de Hidrogênio.** 5º Congresso Internacional de Bioenergia, Paraná, 2010. Disponível em <http://repositorio.ipen.br/bitstream/handle/123456789/17855/15804.pdf?sequence=1> Acesso em 21 de outubro de 2021

TAVARES, P. T. **Caracterização física e química de resíduos sólidos na cajucultura e avaliação do potencial energético em processo de conversão térmica.** Dissertação (Mestrado). Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis- Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2016.

TSAI, W.T.; LEE, M.K.; CHANG, Y.M. **Fast pyrolysis of rice straw, sugarcane bagasse and coconut shell in an induction heating reactor**. Journal Anal. Appl. Pyrolysis, v. 76, p. 230 – 237, 2006.

TSAMBA, A. J.; YANG, W.; BLASIAK, W. (2006) **Pyrolysis characteristics and global kinetics of coconut and cashew nut shells**. Fuel Processing Technology. v. 87, p. 523-530.

TORRES FILHO, A. **Aplicação do processo de pirólise para valoração, cogeração de energia e tratamento de resíduos**. Tese (doutorado) Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. Belo Horizonte-MG (2014)

VASCONCELOS M. S. , GOMES R. N. F., de OLIVEIRA M. L., NUNES P. D. C., TOMÉ A. R., MAIA de S. F. Y., PINHEIRO F. G., MOURA C.F., MIRANDA M.R., MOTA E. F., de MELO D. F. **Anti-inflammatory and wound healing potential of cashew apple juice (Anacardium occidentale L.) in mice**. Experimental Biology And Medicine. 2015; 240(12): 1648-1655.

WESTPHALEN A. P. C ; CORÇÃO G.; BENETTI A. D. **Utilização de carvão ativado biológico para o tratamento de água para consumo humano**. Rev, Eng Sanit Ambient Vol.21 nº 3 (2016) pag. | 425-436.

WIGGERS, V. R.. **Simulação, projeto e construção de uma unidade piloto multi-propósito para pirólise de resíduos**. Faculdade de Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas. Dissertação de mestrado, 2003.

YAMAN, S. **Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks**. Energy Conversion and Management, v. 45, n.5, p. 651-671, 2004.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. **Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis**. Fuel, v. 86, p.1781-1788, 2007.