



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA - CTEC
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA



ARTHUR VIEIRA DA SILVA MONTORO

**PRODUÇÃO E ANÁLISE DE BRIQUETES DE BIOCÁRVÃO DO OURICURI
ORIUNDOS DA PIRÓLISE**

Maceió
2020

ARTHUR VIEIRA DA SILVA MONTORO

**PRODUÇÃO, OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE DE BRIQUETES DE BIOCARVÃO
ORIUNDOS DA PIRÓLISE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia
Química da Universidade Federal de
Alagoas como requisito parcial para a
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. João Inácio Soletti

Coorientador: Mozart Bispo Daltro

Maceió
2020

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

M798p Montoro, Arthur Vieira da Silva.

Produção, otimização e análise de briquetes de biocarvão oriundos da pirólise / Arthur Vieira da Silva Montoro. – 2020.

39 f. il. : figs. ; tabs. color.

Orientador: João Inácio Soletti.

Co-orientador: Mozart Bispo Daltro.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química).
Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2021.

Bibliografia: f. 37-39.

1. Biocarvão. 2. Ouricuri. 3. Briquetes (Combustível). 4. Pirólise. 5.
Biomassa residual. I. Título.

CDU: 662.65

AGRADECIMENTOS

Gostaria primeiramente agradecer a Deus por ter me proporcionado todas essas experiências dentro e fora do campus da Universidade Federal de Alagoas, a minha Família por ter me apoiado sempre durante toda minha vida, minha namorada e também aos meus amigos que sempre estiveram presente me ajudando nos melhores e piores momentos durante o curso. Também gostaria agradecer aos professores que fizeram parte do meu aprendizado, todos eles me ajudaram a guiar meus estudos e me fizeram ser uma pessoa mais dedicada.

Não posso esquecer da PROTEQ que foi um marco para mim desde o momento de entrada na empresa, assim como toda minha vivência dentro da universidade com as pesquisas e monitoria.

Agradeço também ao meu querido amigo, professor e orientador João Inácio Soletti que antes mesmo do início do curso me mostrou como a engenharia química é um belo curso assim como meu parceiro de fotografias, pesquisa e Coorientador Mozart Bispo Daltro.

Desta forma, gostaria de expressar toda minha gratidão a todos que fizeram parte da minha história dentro e fora dessa universidade.

RESUMO

O trabalho tem por objetivo a produção, otimização e análise de briquetes de biocarvão gerado através da pirólise a vácuo dos resíduos do Ouricuri (*Syagrus coronata*). Muitos estudos mostram que 25% dos resíduos gerados poderiam ser utilizados para produção de bioenergia e estima-se que em 2030, tanto a produção agrícola como a florestal deverá sofrer grande incremento, resultando em maiores quantidades de resíduos. A pirólise se destaca por gerar produtos como: bio-óleo, biogás e biocarvão; agregando valor às biomassas residuais, reduzindo o volume de resíduos, e como consequência, reduzir o impacto ambiental. Nesse contexto, a aplicação do biocarvão como briquetes apresenta uma solução eficiente em termos energéticos gerados por esses resíduos. A fim de aumentar sua eficiência em comparação com os comerciais, será realizado o estudo da briquetagem com diferentes combinações de biocarvão, aglutinantes, pressão e temperatura, seguida por análises da composição imediata (teor de umidade, voláteis e carbono fixo) como também o poder calorífico superior (PCS). Através deste estudo, deseja-se obter resultados que viabilizem a utilização de resíduos do endocarpo do Ouricuri para a produção de briquetes de biocarvão, comprovando a sua eficiência energética com baixo custo. Por meio desta pesquisa serão colocados em prática conhecimentos adquiridos ao longo das disciplinas de operações unitárias; cálculos de reatores; fenômenos de transporte; termodinâmica; química orgânica, assim como técnicas de análise química qualitativa e quantitativa.

Palavras-chaves: Biocarvão, Ouricuri, Briquete, Pirólise, Biomassa Residual

ABSTRACT

The work aims at the production, optimization, and analysis of biochar briquettes generated through the vacuum pyrolysis of Ouricuri (*Syagrus coronata*) residues. Many studies show that 25% of the waste generated could be used for the production of bioenergy and it is estimated that in 2030, both agricultural and forestry production should undergo a substantial increase, resulting in higher amounts of waste. Pyrolysis gained prominence for generating products such as: bio-oil, biogas, and biochar, adding value to the residual biomass, reducing the volume of waste, and as a consequence, reducing the environmental impact. In this context, the application of biochar as briquettes presents an energy-efficient solution generated by these residues. In order to increase its efficiency compared to the commercial ones, the study of briquetting with different combinations of biochar, binders, pressure and temperature will be carried out. This is followed by analyzes of the immediate composition (moisture content, volatiles and fixed carbon) as well as the power superior calorific value (PCS). Through this study, we want to obtain results that enable the use of residues from the Ouricuri endocarp for the production of biochar briquettes, proving their energy efficiency at low cost. Through this research, the knowledge acquired throughout the disciplines of unitary operations will be put into practice; reactor calculations; transport phenomena, thermodynamics; organic chemistry; as well as qualitative and quantitative chemical analysis techniques.

Keywords: Biochar, Ouricuri, Briquette, Pyrolysis, Residual biomass

Sumário

1. INTRODUÇÃO	6
2. OBJETIVOS.....	8
2.1 Objetivos gerais	8
2.2 Objetivos específicos	8
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
4 METODOLOGIA	17
4.1 Biomassa.....	17
4.2 Pirólise.....	17
4.4 Densificação Energética	18
4.5. Característica do Biocarvão.....	20
<i>Análise Termogravimétrica (TGA)</i>	20
<i>Poder Calorífico</i>	20
<i>Perfil de Combustão</i>	21
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
5.1. Análise Termogravimétrica do Ouricuri	23
5.2. Caracterização dos Briquetes de Carvão Vegetal.....	24
5.3. Análise Qualitativa dos Briquetes Produzidos	24
5.4. Resistência a Compressão Mecânica.....	27
5.4 Perfil de Combustão	31
5.5 Poder Calorífico.....	33
5.6 Considerações Finais	34
6 CONCLUSÃO.....	36

1. INTRODUÇÃO

A utilização de biomassas como fonte de combustíveis é uma excelente alternativa para a diminuição da extração de combustíveis fósseis. Dessa forma, muitos estudos pelas comunidades acadêmicas têm sido intensificados por buscas dessas novas fontes alternativas para geração de energia (Carvalho e Poppe, 2010).

Biomassa pode ser compreendida como qualquer material orgânico, de origem vegetal em que apresente energia disponível para queima. Nesse contexto o Brasil, devido a toda sua extensão territorial, se destaca como um grande potencial para o reaproveitamento de biomassa com processos de conversão térmicos, tendo como destaque resíduos pecuários, agrícolas e florestais (Yaman, 2004; Alho, 2008).

A elevação com a preocupação com problemas ambientais, vem levando um aumento no interesse sobre a destinação dos resíduos agroindustriais. O maior conhecimento a respeito da composição desses resíduos, sendo de resultados de diversos trabalhos científicos, tem possibilitado uma ampliação do leque de usos, principalmente no setor energético.

Dentre diversos resíduos agrícolas, pode ser destacado a palmeira nativa Ouricuri (*Syagrus coronata*), está palmeira encontra-se em maior concentração na região nordeste, principalmente em regiões semiáridas, muito comum nas regiões da caatinga, tendo sua maior parte no sertão nordestino e no norte de Minas Gerais (Crepaldi, 2001)

A biomassa pode ser convertida em substâncias sólidas (biocarvão), líquidas (bio-óleo) e gasosas por meio de processos termoquímicos como a pirólise, carbonização, gaseificação, dentre elas, a pirolise tem sido uma boa alternativa para o reaproveitamento energético de resíduos agrícolas, tendo como consequência a redução dos volumes de resíduo e dos impactos ambientais do uso dessas biomassas. (Bispo, 2018)

A utilização da pirolise de biomassas residuais como da casca do coco pode ser considerado uma boa alternativa para o reaproveitamento energético. Atualmente, o Brasil se destaca no setor mundial como maior produtor e consumidor de carvão vegetal, sendo o único país que possui uma destinação industrial em larga escala, principalmente

para produção de ferro gusa e aço (Azevedo, 2008). Sendo assim, o processo de carbonização tem como objetivo principal a obtenção da fase sólida (partículas de carvão vegetal), composta basicamente por partículas de carbono.

Visando a produção de briquetes, faz necessário um estudo aprofundado pela busca de um aglutinante que consiga promover as características necessárias para produção de um briquete de qualidade, assim como a composição correta para uma boa queima sem afetar em seu alto teor de cinzas.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

Estudar o processo de melhoramento na produção de briquetes de carvão a partir da pirólise de resíduos agroindustriais analisando as características físico-químicas.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar a pirólise do coco visando a geração de biocarvão (Biochar)
- Produção dos briquetes de carvão utilizando diferentes aglutinantes (Amido de milho e Fécula de mandioca) em diferentes composições.
- Comparação dos briquetes produzidos em termos das características físico-químicas e com relação a resistência mecânica.
- Determinação das variáveis de processos adequadas para produção com relação ao tempo de queima, poder calorífico e resistência mecânica obtendo um biocarvão mais eficiente

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Biomassa Residual

A biomassa residual pode ser dividida em 3 grandes grupos de acordo com a sua origem, sendo eles:

- Resíduos Agrícolas ou agroindustriais;
- Resíduos Florestais;
- Resíduos Biogênicos ou resíduos municipais.

Sendo dentre os 3, os resíduos agroindustriais o que apresenta um maior valor agregado devido a sua abundância e sua diversidade em aplicações industriais.

Atualmente, os materiais lignocelulósicos são considerados os maiores resíduos agrícolas do mundo (SAFARI, SINEGANI et al., 2005). O Brasil hoje tem a sua economia baseada na produção agrícola, produzindo em 2012 cerca de 180 milhões de toneladas de grãos, gerando, por ano, cerca de $1,06 \times 10^{10}$ toneladas de resíduos de composição lignocelulósica.

Além dos resíduos gerados durante o processo produtivo, o Brasil hoje produz uma quantidade considerável de resíduos durante o processo de beneficiamento ou processamento de culturas agrícolas. O Brasil hoje é considerado o maior produtor de café e o segundo maior consumidor, sendo assim possui uma produção anual de 50 milhões de sacas de 60 kg gerando assim mais de 1 bilhão de toneladas de casca de café como resíduo (CONAB, 2012).

Dessa forma, devido a essa abundância de resíduos, podemos ter um grande reaproveitamento energético, assim como um grande volume de matéria prima suscetível a produção de biocombustíveis, produtos químicos e farmacêuticos sem que acabe afetando a sustentabilidade dos outros setores.

Um outro fator de grande relevância para o reaproveitamento energético desses resíduos está justamente nas questões ambientais por questões de reutilização desses materiais associados a um fator econômico, levando em consideração o descarte, armazenamento e disposição final desses resíduos.

Quando se compara ao teor energético dessas Biomassas em relação aos combustíveis derivados do petróleo, os quais são muito inferiores, porém sabe-se que essa energia é considerada uma energia limpa com teores desprezíveis de enxofre e cinzas que por consequência emitem uma quantidade menor de SO_2 e NO_x , além de todo o

reaproveitamento de resíduos que antes eram apenas desprezados pelas agroindústrias (FIGUEIREDO, 2011).

3.2 Ouricuri mundo e Brasil

O licuri ou ouricuri (*Syagrus coronata* (Mart) Becc.) é uma das principais palmeiras nativas do semi-árido brasileiro. Na região de origem, tem a capacidade de suportar secas prolongadas, florescendo e frutificando por um longo período do ano. Ela é empregada na alimentação animal (caprinovinocultura e bovinocultura), alimentação humana, produção de artesanato, produção de cera, construção civil, indústria de cosméticos, fabricação de saponáceos e para manufatura de tintas, além de ter um alto potencial para fins ornamentais e para a produção de biodiesel.

O endocarpo do Ouricuri é a camada na qual se constitui o fruto, sendo amplamente utilizado no artesanato (OLIVEIRA, 2012). Porém ainda há uma quantidade de matéria prima muito maior sendo gerada na qual acaba sendo descartado gerando um problema ambiental. Dessa forma, é muito importante fazer uma avaliação da eficiência do biocarvão produzido a partir do endocarpo do fruto do Ouricuri, sendo um material com menor impacto ambiental e tendo um reaproveitamento energético com diversas aplicações industriais.

O fruto possui uma amêndoa com endoderme abundante, ovoide e carnosos. Enquanto não amadurece apresenta o endosperma líquido, que após a maturação se torna sólido. O fruto na maturação apresenta-se com coloração variada, do amarelo-claro ao alaranjado. Os frutos maduros têm polpa amarela, pegajosa e adocicada. São produzidos anualmente, no entanto, há um maior rendimento nos meses de março, junho e julho.

Figura 1, (CREPALDI, 2001).

Figura 1 – endocarpo do Ouricuri



Fonte: <http://www.cerratinga.org.br/licuri>

3.3 Pirolise como fonte energética

Na década de 70 como a crise no setor do petróleo vem trazendo consequências para o Brasil e o mundo quando se trata de alternativas para esses combustíveis fósseis, demonstrando uma forte dependência para essa fonte energética. Dessa forma, é visível o aumento e o incentivo no setor de pesquisa e desenvolvimento para tecnologias de produção de energia a partir de biomassa como também para a obtenção de outros subprodutos da indústria química e que até hoje são produzidos essencialmente a partir do petróleo. (Rocha, L. G., 2011).

A biomassa pode ser considerada uma fonte renovável de energia, ou até mesmo uma energia limpa, resultante do armazenamento da energia solar proveniente da fotossíntese. É através desse processo que as plantas convertem o gás carbônico (CO₂) da atmosfera em compostos orgânicos que são essenciais para o seu crescimento. (Camargo, 2006). Quando tratamos de processos de conversão energética dessas biomassas, podem ser divididos em dois métodos, biológicos e térmicos. Dessa forma, podemos especificar quanto aos biológicos, a fermentação e a digestão anaeróbica, enquanto os processos térmicos podem ser exemplificados com a combustão, gaseificação, liquefação e a pirolise, **Tabela 1** (FIGUEIREDO, 2011)

Tabela 1 - Rendimentos dos produtos típicos obtidos por diferentes metodologias (tese)

Processo	Condições	Líquido	Carvão	Gás
Pirólise	Temperatura de processo moderada (450 – 700 °C). Curtos tempos de residência.	75%	12%	13%
Combustão	Baixas temperaturas (400 – 450° C), longos tempos de residência (podendo ser horas ou dias).	30%	35%	35%
Gaseificação	Altas temperaturas (900°C), longos tempos de residência.	5%	10%	85%
Liquefação	Moderadas temperaturas (250 - 400°C) altos tempos de residência (30 – 120 min).	65%	17%	18%

Fonte: (BISPO, 2018)

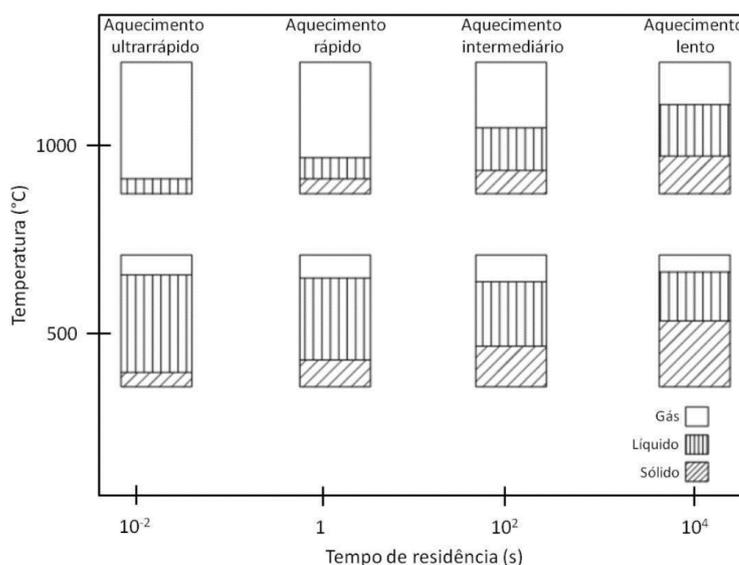
A pirólise é caracterizada pela degradação térmica de compostos orgânicos na ausência de oxigênio, ou com um limite mínimo de suprimento de oxigênio. O objetivo principal da pirolise é da obtenção de novos produtos que possuam uma eficiência energética maior em relação a biomassa inicial (MOK et al., 1992) (4). É através desse processo, em temperaturas relativamente baixas (350 – 800 °C) que ocorre diversas reações químicas e de processos de transferência de massa e calor, dando origem a produtos sólidos (Carvão e matéria mineral), líquidos (ácido pirolenhoso e bio-óleo) e gasosos (Vapores orgânicos e gases não condensáveis), tendo diversas aplicações industriais.

A aplicação de altas taxas de aquecimento resulta em uma pirólise rápida (*fastpyrolysis*), proporcionando alto rendimento de líquidos (bio-óleos) com alto poder calorífico, enquanto baixas taxas de aquecimento favorecem a formação do material sólido (carvão vegetal) (BRIDGWATER, 1996; ROCHA, 2011)

Sobre a influência da matéria-prima utilizada, o tamanho do grão influencia a taxa de transferência de calor. Partículas grandes aumentam a resistência à transferência, como resultado disto, as partículas grandes pirolisam-se abaixo de 400 °C (pirólise lenta), conseqüentemente para tempos menores (pirólise rápida) exige-se partículas menores.

Figura 2 (ROCHA, 2011).

Figura 2 - Produtos da pirólise em função do tempo de residência e da temperatura de reação



Fonte: Adaptado de Mezerette e Girard (1991)

3.4 Carvão Vegetal

O carvão vegetal pode ser definido como um produto sólido, rico em carbono, proveniente de espécies de madeira, resíduos agroindustriais ou outras formas de biomassa (FFTF, 2009; DE OLIVEIRA, 2013). Apresenta uma estrutura muito porosa, cerca de 70 a 80% do seu volume, pelo fato da água e dos compostos voláteis presentes na biomassa serem eliminados durante o processo de pirolise, deixando os espaços vazios. Desta forma, apresenta uma baixa densidade, variando entre 200 a 400 kg/m³ dependendo da técnica aplicada e ao tempo de residência do processo.

A produção de carvão vegetal no Brasil é de grande importância econômica para o país, uma vez que tem uma participação significativa na indústria siderúrgica nacional. O carvão vegetal é utilizado na produção de ferro gusa e ferro-ligas, que são utilizados na fabricação de aço e peças de ferro fundido, sendo, ainda componente importante na produção do silício metálico. Em 2016, no Brasil foram produzidas mais de 5,5 milhões de toneladas de carvão vegetal para abastecer a produção de 5,7 milhões de toneladas (Mt) de ferro gusa (IBGE, 2017), 1,9 Mt de fundidos de ferro e 0,3 Mt de ferroligas (MME, 2017).

Além da aplicação como fonte energética, o carvão também apresenta propriedades de adsorvente, corretor de solo, fertilizante de solo, termo redutor, ou até mesmo como carvão ativado na indústria química, farmacêutica e de alimentos. Segundo Pereira (2009), o setor industrial consome cerca de 89,5% da produção de carvão, o setor

residencial cerca de 9% e o setor comercial consome os 1,5% restantes, sendo representados por churrascarias, pizzarias e padarias.

3.5 Densificação energética (Briquetagem)

As partículas de carvão apresentam baixa densidade e elevada friabilidade, além dessas características, apresentam alguns problemas com falta de uniformidade granulométrica e rápida combustão, implicando em recargas com mais frequências e um elevado custo com transporte (Dias *et al.*, 2012). Entretanto, a densificação energética (Briquetagem) vem sendo uma excelente alternativa para amenizar essas características.

A briquetagem é uma técnica na qual se aplica uma certa pressão em uma mistura de pequenas partículas de material sólido carbonizado juntamente com um aglutinante em certa composição, dentro de moldes matrizes, através de orifícios entre cilindros rotativos de forma a conseguir blocos de carvão compactos com forma definida (Dias *et al.*, 2012). Dessa forma, é possível então a obtenção de um produto com homogeneidade granulométrica, de maior densidade energética por unidade de volume (cerca de 5 vezes mais em relação às partículas carbonizadas), de fácil manipulação de transporte, baixa umidade e com elevada capacidade de armazenamento devido à resistência à geração de finos, além de possuir um alto poder calorífico geram um menor teor de cinzas.

No Brasil, não existe nenhuma metodologia ou norma específica para a fabricação e comercialização de briquetes (VENDRASCO E YAMAJI, 2009), porém, de maneira geral, as etapas de produção de briquetes podem ser divididas em quatro fases.

1. Preparação: Consiste na determinação das características de compactação do material e qual o equipamento a ser utilizado. Depois disso, é determinado o teor de umidade e o tipo de aglutinante a ser utilizado, sendo posteriormente especificado a quantidade de água e proporção de aglutinante;
2. Mistura: Por questão de homogeneidade, a mistura dos reagentes é uma das etapas mais importantes da briquetagem, pois é de extrema importância que o aglutinante seja distribuído uniformemente por toda a superfície do material a ser briquetado;
3. Compactação: Consiste na aplicação de uma força de compressão com a finalidade de promover formato geométrico pré-definido garantindo resistência mecânica para o briquete;

4. Secagem: Durante a etapa de secagem, os briquetes são aquecidos e, em seguida, resfriados lentamente, evitando assim a formação de fraturas provenientes de choques térmicos, facilitando assim o manuseio.

Portanto, o conhecimento sobre esses fatores influencia diretamente na qualidade dos briquetes, justamente por isso, deve-se ter o controle sobre o teor de cinzas, a umidade e principalmente a heterogeneidade no tamanho das partículas.

As cinzas agregam vários elementos que não são relevantes nas reações de combustão, como por exemplo, o potássio, fósforo e o cálcio reduzindo assim a eficiência de queima dos briquetes (De Oliveira, 2013). Sendo assim, quanto menor o teor de cinzas melhor será a qualidade da queima e conseqüentemente melhor será a qualidade do briquete. Outro fator de grande relevância segundo De Oliveira (2013) está relacionado com o teor de umidade, visto que quanto maior a umidade, menor será seu desempenho de queima, devido uma parte da energia de queima ser utilizado para aquecer a vaporizar essa umidade, assim como a relação com a granulometria dos resíduos, pois quanto menor a partícula melhor será o processo de compactação e melhor será a resistência mecânica do briquete.

3.6 Aglutinantes

Como uma questão de reduzir a pressão para fazer briquetes, o aglutinante desempenha um papel importante. O uso do aglutinante fará com que alguns tipos de materiais funcionem com diferentes tipos de briquetadores, devido ao menor requisito de pressão, garantindo também uma alta resistência mecânica aos briquetes. Com diferentes usos, podemos escolher diferentes aglutinantes para a produção dos briquetes, como por exemplo, o amido, que é um aglutinante muito comum e fácil de obter, apresentando um bom desempenho na fabricação, é amplamente usado para fazer carvão para churrasco, pois é natural e sem fumaça. Já para o uso industrial, devido a necessidade de um alta resistência a altas temperaturas, o amido deixou de ser uma boa opção, sendo substituídos pelos aglutinantes que contém o silício em sua composição. Esses aglutinantes, em sua maioria líquidos, melhoram o desempenho do briquete, com relação a resistência a alta temperatura, garantindo uma função de lubrificação e aumentando a vida útil dos moldes de briquete. (FONTES, 1989)

A partir do tipo de ação, pode-se dividir os briquetes em três grupos: tipo matriz, tipo filme e o tipo químico. **Tabela 2.**

Tabela 2 – Exemplos de aglutinantes para cada grupo

Tipo matriz	Tipo Filme	Tipo Químico
Asfalto	Amido de Milho	$\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2$
Cimento	Fécula de Mandioca	$\text{MgO} + \text{MgCl}_2$
Alcatrão	Silicato de Sódio	HNO_3
Parafina	Goma	Silicato de sódio + CaCl_2
Argila	Bentonita	Sílica Gel
Metil Celulose	Lignossulfonatos	Sol de Sílica

Fonte: Adaptado, <https://briquettesolution.com/all-about-binders-make-briquette-with-proper-binder/>

Tipo Matriz:

Esses aglutinantes normalmente utilizados para briquetagem por extrusão e compressão. Normalmente, o volume vazio entre a matéria-prima será de cerca de 2 a 10%, esse tipo de aglutinante preencherá a lacuna entre a matéria-prima, aumentando a sua plasticidade e a coesão das partículas. Este tipo de aglutinante também possui outras funções como diluição e lubrificação, além de reduzir o atrito interno da matéria-prima.

Tipo Filme:

Sendo em sua maioria um aglutinante do tipo líquido, ele reveste a partícula da matéria-prima como um filme. Após o briquete e seco, ele aumenta a força do briquete, utilizando a tensão superficial para unir o material, tendo como fator mais importante a área de superfície específica. Este tipo de aglutinante não é indicado para materiais com pequenas dimensões. Para os materiais com pequena densidade aparente e alta área superficial específica, como o carvão, o custo do aglutinante será muito superior a 30% (sendo água em sua maioria).

Tipo Químico:

O tipo químico é um tipo de aglutinante na qual ocorre uma reação química entre o aglutinante de mistura com o material, aumentando assim a resistência da ligação entre as partículas do material, tendo como exemplo o cal com a água. (Mills, 1988)

4 METODOLOGIA

4.1 Biomassa

Os experimentos foram realizados a partir de amostras previamente pirolisadas pelo laboratório de Sistema de Separação e Otimização de Processos (LASSOP) a partir de uma pirolise lenta, utilizando como biomassa o resíduo do Ouricuri sob uma condição de temperatura de 500°C com uma taxa de aquecimento de 10°C/min, parâmetros obtidos a partir do TGA/DTG (Bispo, 2018).

Dessa forma, os experimentos foram divididos nas seguintes etapas, moagem das partículas de carvão, mistura dessas partículas com diferentes aglutinantes em estudo, processo de densificação energética (briquetagem) e secagem dos briquetes formados. Em seguida foram feitos ensaios com os briquetes para que pudesse ser analisado sua eficiência energética e sua resistência mecânica

4.2 Pirólise

O processo de pirólise foi realizado na planta piloto anexa ao laboratório de Sistemas e Otimização de Processos (LASOP) onde é composta por um reator tubular de aço inoxidável, um forno tubular vertical modelo JUNG LT6 2010 de 1 kW de potência, revestido por uma manta térmica com o objetivo de diminuir a perda de calor. Possui também um controlador de temperatura e de taxa de aquecimento JUNG J400, modelo 6.2010 de 2,5 kW e o sistema de condensação é constituído por 4 condensadores de vidro ligados em série e resfriados por meio de um banho termostático mantido a 5 °C, modelo TECNAL TE-18, com a finalidade de condensar os gases do processo e coletar em kitassatos de vidro conectados na parte inferior dos condensadores. Faz parte também da planta uma bomba de vácuo FANEM, modelo 089 Cal, mantendo uma pressão negativa de 20 kPa no sistema.

Para este trabalho foi utilizado carvão previamente pirolisado nas condições de 500°C com uma taxa de aquecimento de 10°C/min permanecido durante 60 minutos.

4.3 Cominuição do Carvão Vegetal

Foi necessário a cominuição do biocarvão devida ao tamanho das partículas, com o intuito de evitar problemas relacionados a ação dos aglutinantes e as características finais dos briquetes. A moagem foi realizada utilizando um moinho de bolas planetário para partículas sólidas (PM 100 CM). A **Figura 3** apresenta as partículas de carvão

produzidas. Após a moagem as partículas estiveram em uma granulometria média menor que 4 mm e foram armazenados para o processo de densificação energética.

Figura 3 – Fotografia do Biocarvão moído



Fonte: Autor

4.4 Densificação Energética

O processo de densificação energética é fundamental para que as partículas possam ser agrupadas em um determinado formato geométrico pré-definido garantindo resistência mecânica em seu transporte e armazenamento. Entretanto para que ocorra esse processo de densificação é necessário a utilização de um aglutinante. Neste trabalho foi utilizado dois aglutinantes diferentes, amido de milho (AM) e a fécula de mandioca (FM). O aglutinante de amido de milho utilizado foi da marca “Aro” comercializado, já a fécula de mandioca foi cedida por uma empresa de agricultura local.

Figura 4 – Aglutinantes utilizados para produção dos briquetes



Fonte: (AUTOR, 2020)

Para o processo de briquetagem foi utilizado uma prensa hidráulica manual (P15ST, Bovenau) e de um molde cilíndrico (matriz) construído no laboratório através da tornearia. Sendo assim, foram feitos testes preliminares com diferentes matrizes para que fosse produzido a matriz final a partir do torno, apresentado pela **Figura 5**.

Figura 5 – Preparação da matriz para produção dos briquetes



(AUTOR, 2020)

As variáveis aplicadas nos processos foram dois tipos de aglutinantes em diferentes porcentagens com relação a massa de mistura (5, 10 e 15%), permanecendo constante a razão entre massa de carvão e água (massa:volume) em 1:0,5 e um tempo de compressão constante de 2 min, parâmetros definidos a partir de experimentos prévios e partir de outro estudo (Zanella, 2018).

Para que o processo de homogeneização ocorresse da melhor forma, foi padronizado a seguinte metodologia:

O aglutinante em estudo foi misturado com água e à esta mistura foi adicionado o carvão seco seguindo para o processo de densificação energética. Utilizando a FM e o AM, a mistura de aglutinante e água foi ativada a partir do aquecimento em torno de 85°C, após atingido esta temperatura e percebido a ação aglutinadora da mistura, foi adicionado o carvão. Após a compactação foi feito um processo de secagem em uma estufa à uma temperatura de 60°C chegando a um teor de umidade final de 15% (base úmida) e após a secagem desses briquetes de carvão foram realizados os testes de resistência mecânica e poder calorífico.

4.5. Característica do Biocarvão

Quando se estuda a utilização de biomassas como fonte energética para qualquer fim, é necessário ter o conhecimento das propriedades físicas e químicas tanto do material lignocelulósico quanto do combustível obtido.

As análises realizadas com a biomassa e com os briquetes de carvão vegetal, tem o intuito de avaliar a influência do processo de pirólise e do processo de densificação energética. Sendo assim, para a biomassa foram realizadas análise de química imediata, análise elementar e análise termogravimétrica.

Análise Termogravimétrica (TGA)

Na análise termogravimétrica foi utilizada uma termobalança (Marca SHIMADZU, Modelo DTG-60H), verificando o comportamento e a estabilidade térmica a partir do aumento da temperatura. Serão utilizados, aproximadamente, 10mg da amostra com uma taxa de aquecimento de 10°C/min em atmosfera inerte (gás nitrogênio) com vazão de 40mL/min até uma temperatura final de 1000°C. (Vieira, 2019)

Poder Calorífico

O poder calorífico é a maneira na qual podemos medir o número de calorias liberadas na combustão completa de uma unidade de massa do combustível, sendo expressa normalmente em kcal/kg para combustíveis sólidos e líquidos e kcal/m³ para combustíveis gasosos. (BARCELLOS, 2007)

O poder calorífico pode ser dividido em duas etapas, poder calorífico superior e inferior. O poder calorífico superior (PCS) é o que ocorre considerando a combustão à volume constante e na qual a água formada durante a combustão é condensada e esse calor gerado devido a condensação é recuperado. Já o poder calorífico inferior (PCI) seria a energia disponível efetiva do material por unidade de massa, pois não é considerado a energia utilizada para a evaporação da água. (DIAS, 2012)

Neste trabalho, foi realizado o poder calorífico dos briquetes produzidos em suas diferentes composições e nos dois diferentes tipos de aglutinantes para que pudesse ser analisado a influência desses dois parâmetros na eficiência calorífica dos materiais.

O PCS foi determinado a partir da utilização da técnica da bomba calorimétrica IKA C2000 Basic. Esta técnica consiste em analisar as calorias liberadas durante uma combustão completa de uma amostra que é introduzida em um recipiente submerso em banho de água. Este experimento foi realizado no laboratório da EMBRAPA (Empresa

Brasileira de Pesquisa Agropecuária) da Universidade Federal de Alagoas no campo do Centro de Ciências Agrárias (CECA).

Já o PCI foi determinado através de uma equação empírica (Eq. 01), na qual é subtraído o calor latente de vaporização da água na temperatura que o experimento foi realizado (540 kcal/kg à 25°C), obtendo assim o calor efetivo do material.

$$PC_{inferior} = PC_{superior} - \text{Calor Latente de Vaporização da Água} \quad \text{eq.(01)}$$

onde: $PC_{inferior}$ é o poder calorífico inferior; $PC_{superior}$ é o poder calorífico superior. O calor latente de vaporização da água à 25°C é 540kcal/kg.

Resistência Mecânica

A resistência mecânica, foi analisada a partir do teste de resistência a compressão, na qual é possível avaliar o comportamento mecânico desse material quando submetido a uma certa carga ou esforço. Sendo um dos parâmetros mais significativos na avaliação do briquete em relação ao seu armazenamento e transporte e de forma indireta, determina o grau de compactação do briquete formado (DE MELO, 2010).

Estes ensaios foram realizados através de uma máquina universal de testes (SHIMADZU) no laboratório de ensaios mecânicos de alagoas (LEMA). Dentre os parâmetros utilizados para o teste, foi baseado no trabalho de Quirino e Brito (1991), utilizando Velocidade de pré teste (0,3 cm/min), velocidade de teste (0,3 cm/min) e célula de carga (10 kN) neste ensaio foi realizado o aumento progressivo contínuo da pressão até que houvesse a ruptura do material. Foram realizados testes em duplicata.

Perfil de Combustão

Neste teste foi possível fazer uma avaliação qualitativa da eficiência de queima do briquete formado, sendo assim, foi possível verificar a temperatura de queima em função do tempo, para que assim fosse possível analisar se a queima do briquete estivesse sendo feita de forma eficiente.

Para essa determinação do perfil de combustão, foi feito um ensaio aplicando uma técnica similar proposta por Quirino & Brito (1991) na qual foi feito a ignição do carvão através de uma resistência e depois foi analisado a temperatura de queima fora da resistência em relação ao tempo comparando os briquetes produzidos com o briquete comercial **Figura 6**. Para a medição da temperatura, foi utilizado um termômetro infravermelho (Alla France, -50°C – 530°C).

Figura 6 – Teste do perfil de combustão nos briquetes



Fonte: (AUTOR, 2020)

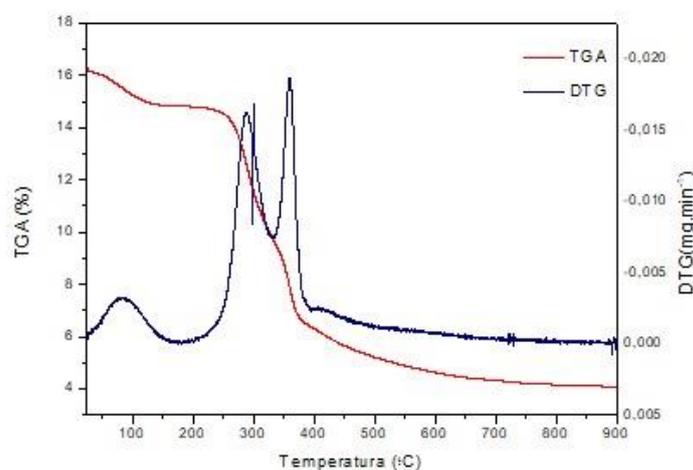
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Análise Termogravimétrica do Ouricuri

A análise termogravimétrica do Ouricuri foi realizada com o intuito de descrever o comportamento térmico da biomassa durante seu processo de carbonização, pelo fato do tratamento térmico gerar variações nas propriedades físicas e químicas nos materiais orgânicos.

O estudo da decomposição térmica foi realizado por meio de uma curva TGA/DTG em uma atmosfera de nitrogênio. Os resultados estão dispostos na **Figura 7**

Figura 7 – Análise termogravimétrica do endocarpo do Ouricuri



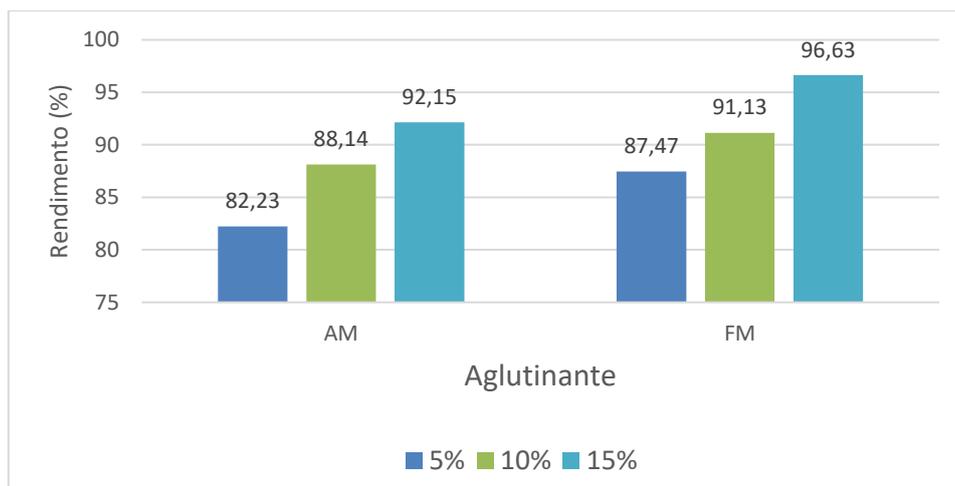
Fonte: (VIEIRA, 2019)

A partir da curva de TGA, pode-se identificar alguns picos da curva DTG, sendo o primeiro representado entre a temperatura de 24 °C e 125°C representando uma perda de 7,8% da massa inicial estando associado a volatilização do grupo hidroxila (Vieira, 2019), comum durante o processo de desidratação. Com o aumento da temperatura, também foi possível notar outros dois picos entre 250 e 315°C (perda de 22,79%) e entre 310 a 360°C (perda de 18,38%) estando associados a degradação da hemicelulose e da celulose (Vieira, 2019). Após essa temperatura, continuou havendo perda de massa associada a lignina, estabilizando na temperatura de 600°C tendo perda de massa mínima. Por esse fato podemos identificar a temperatura de 500°C como ideal para a produção do carvão, visto que tem-se que atingir uma baixa temperatura para favorecer melhor condição para formação de carvão, porém deve-se ter cuidado com temperaturas muito baixas para evitar a não degradação de algumas substâncias indesejáveis (Substâncias do alcatrão) capazes de gerar muito odor durante a queima.

5.2. Caracterização dos Briquetes de Carvão Vegetal

Após a produção dos briquetes produzidos referente ao item 4.2 (Metodologia). Foram produzidos um total de 24 briquetes de carvão com no mínimo quatro briquetes de carvão para cada tipo de aglutinante e proporção estudada. Dessa forma, foi calculado o rendimento mássico ($\frac{g_{\text{briquete}}}{g_{\text{mistura}}}$) da produção dos briquetes apresentados na **Figura 8**

Figura 8 - Rendimento da produção de briquetes



Fonte: (AUTOR, 2020)

Como qualquer processo industrial, houve perdas durante a produção dos briquetes, essas perdas estão referentes ao material retido no béquer durante o processo de preparação das misturas na pré-compressão, como também no material retido na matriz da pós compressão. Percebemos que devido a maior concentração de aglutinante gerou menos perda para o processo, visto que a massa de carvão se tornava mais aglutinada.

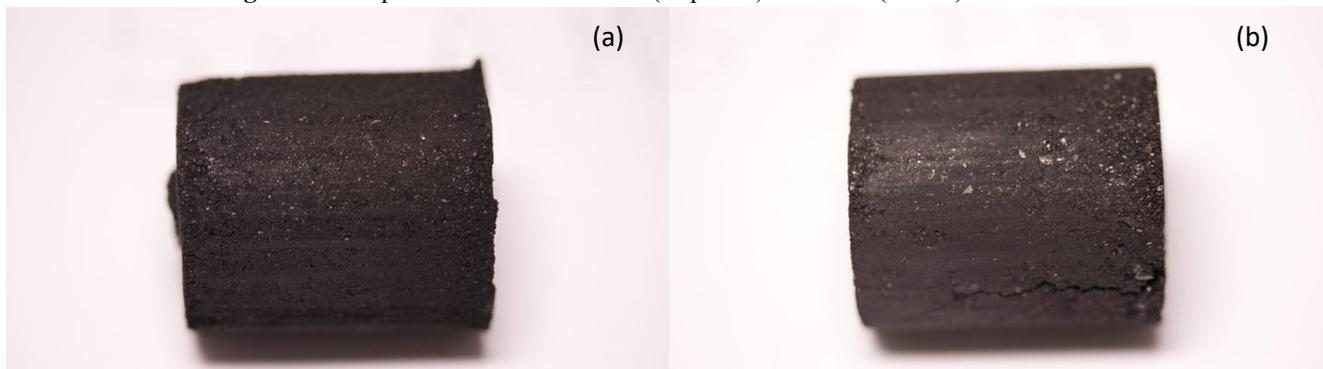
5.3. Análise Qualitativa dos Briquetes Produzidos

Um dos problemas referentes ao processo de densificação energética, está justamente na qualidade dos briquetes gerados, para isso além de toda resistência mecânica presente, é imprescindível que a metodologia adotada para o processo de produção seja feita com cuidado para evitar a formação de rachaduras ou fraturas nos briquetes. (Vendrasco, 2009)

Essas rachaduras podem trazer sérios danos ao produto, visto que sua resistência mecânica é afetada, perdendo assim o objetivo do briquete (transporte e armazenamento). Dessa forma, foi feito uma análise qualitativa em relação aos briquetes gerados.

Comparação entre os briquetes produzidos utilizando AM e FM a 5%

Figura 9 – briquetes de carvão 5% AM (esquerda) e 5% FM (direita)



Fonte: (AUTOR, 2020)

Observando a **Figura 9** percebe-se uma certa similaridade entre os carvões com 5% de aglutinante, sendo a única diferença a presença de leves rachaduras nos briquetes de fécula de mandioca, devido a menor coesão das partículas de carvão. Quando analisado a presença de partículas brancas no carvão que pode ser representado pelas partículas de aglutinante não dissolvido na mistura é possível verificar uma maior presença nos briquetes em que foi utilizado a fécula de mandioca como aglutinante.

Comparação entre os briquetes produzidos utilizando AM e FM a 10%

Figura 10 – briquetes de carvão 10% AM (esquerda) e 10% FM (direita)



Fonte: (AUTOR, 2020)

Segundo a **Figura 10** percebe-se uma leve diferença dos briquetes com 5% de aglutinante. Já é possível perceber uma maior coesão das partículas de carvão sendo um briquete mais rígido e mais resistente. Percebe-se uma melhor estrutura no briquete de FM, por aparentar um briquete mais homogêneo e com uma melhor dissolução do aglutinante à mistura.

Comparação entre os briquetes produzidos utilizando AM e FM a 15%

Figura 11 – briquetes de carvão 15% AM (esquerda) e 15% FM (direita)



Fonte: (AUTOR, 2020)

Quando analisado os briquetes com 15% de aglutinante a partir da **Figura 11**, percebe-se a formação de briquetes com uma maior rugosidade em sua estrutura, isso se deve justamente pela elevada quantidade de aglutinante a estrutura podendo comprometer em sua resistência. Já com relação a presença de partículas brancas, pode-se notar uma maior quantidade, justamente pela maior concentração de aglutinante que acaba não se dissolvendo durante a mistura.

Comparação entre as diferentes concentrações de 5, 10 e 15% com AM

Figura 12 – briquetes de carvão 5%, 10% e 15% com AM (esquerda para direita)



Fonte: (AUTOR, 2020)

A partir da **Figura 12**, percebe-se a diferença com relação a estrutura de cada briquete com o aumento da concentração de aglutinante. De forma qualitativa, o briquete com 10% de aglutinante aparenta uma melhor uniformidade e homogeneidade com relação ao processo de briquetagem, já o briquete com 15% demonstrou paredes com mais rugosidade e mais ásperas, podendo comprometer com sua estrutura em relação a sua resistência a compressão. Este resultado também se repete da mesma forma com os briquetes de FM.

5.4. Resistência a Compressão Mecânica

Esses ensaios foram realizados com briquetes em todas as proporções e com os dois tipos de aglutinantes para que fosse possível analisar o efeito do aglutinante e da quantidade em relação a sua resistência mecânica a compressão. Sendo assim, foi feito o ensaio até que houvesse a ruptura do material, onde foi percebido de forma sensorial e visualizada graficamente pelo software utilizado pela máquina

As imagens dos briquetes produzidos antes e depois da ruptura durante os ensaios são apresentadas pela **Figura 13**

Figura 13 – Carvão antes e depois do teste de compressão (5% AM)



Fonte: (AUTOR, 2020)

Os resultados de análise de resistência mecânica geralmente são expressos através de uma curva denominada *Stress x Strain*, na qual se é obtida através da relação da força (*Stress*) aplicada sobre em uma determinada área (Pressão), necessária para produzir uma deformação (*Strain*) sobre o corpo em estudo.

Para efeito de resultado, pode-se inferir que o *Stress* está diretamente relacionado com a resistência do material, ou seja, quanto maior o seu valor, maior será a resistência do briquete, podendo suportar uma maior carga de força sobre o material, já o valor do *Strain* está diretamente relacionado com o deslocamento em relação ao seu tamanho inicial que ocorre durante a aplicação de força sobre o corpo de prova até a ruptura, sendo assim, este efeito de deslocamento tem relação com a porosidade do corpo de prova (BOROWSKI, 2011)

. Resistência mecânica a compressão dos briquetes de amido de milho

As médias obtidas para a máxima resistência a compressão e para a deformação utilizando o amido de milho estão descritos na **Tabela 3**, fazendo o comparativo entre as concentrações de 5, 10 e 15% de aglutinante.

Tabela 3 – Tensão máxima de ruptura para diferentes concentrações de aglutinantes de AM

Concentração de Aglutinante (%)	Tensão de ruptura (N/mm ²)	Deslocamento da perturbação (%)
5%	4527,98	1,163
10%	6796,41	1,912
15%	2880,26	2,777

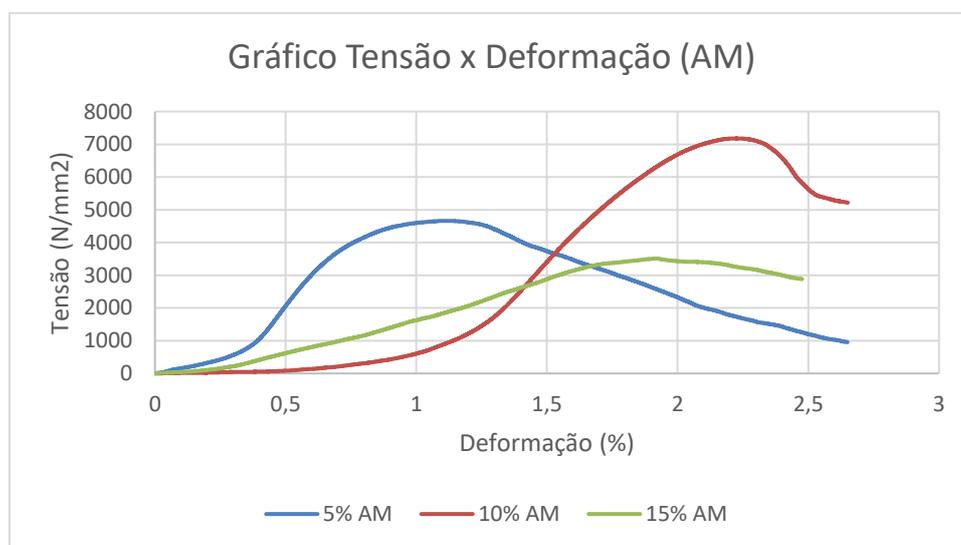
Fonte: (AUTOR, 2020)

Quando observado os valores brutos da tensão de ruptura (*Stress*) obtidos, percebe-se um aumento da tensão de ruptura com o aumento da concentração de aglutinante, porém com o aumento excessivo dessa concentração começam a surgir alguns problemas estruturais nos briquetes, isso pode ser percebido visualmente nos briquetes gerados, pois eles acabam tendo alguns problemas relacionados à presença de rugosidade em suas paredes influenciando na resistência do material.

Sendo assim, percebe-se que a concentração de 10% de AM apresentou uma melhor resistência mecânica em relação as outras concentrações, sendo o de 15% o pior resultado. Isso se deve a faixa ideal de aglutinante, sabendo que existe um ponto ótimo de aglutinante à mistura (Zanella, 2018). Esses valores condizem, visto que baixo teor de aglutinante acaba gerando um material menos rígido, graças a ação aglutinadora, por isso quando foi aumentado a concentração desse aglutinante de 5% para 10% foi garantido um aumento de 50,09% na força de ruptura do material, aumentando assim a resistência do material. Porém quando esse aumento da concentração de aglutinante passa para faixa de 15% percebeu-se um decréscimo de 57,61% na força de ruptura, justamente pela presença de maior rugosidade e deformidade no briquete.

Já quando analisado os valores do deslocamento da perturbação (*Strain*) observamos um aumento progressivo com o aumento da concentração, isso se deve justamente pelo aumento da rugosidade, levando a maior porosidade do material. Esta maior porosidade permite um “alongamento” maior do material, tendo uma deformidade maior em seu volume quando aplicado uma força contínua sobre o material. Sendo assim, maiores concentrações de aglutinantes geram um maior deslocamento de perturbação, tendo o briquete de 15% AM um maior *Strain*

Através dos valores obtidos acima, poderíamos apresentar o briquete 10% AM como o que apresenta uma maior resistência mecânica, e pode-se observar as curvas *Stress x strain* dos ensaios realizados para cada concentração através da **Figura 14**.

Figura 14 - Curvas Stress x Strain dos briquetes de 5, 10 e 15% AM

Fonte: (AUTOR, 2020)

TEXTO

Resistência mecânica a compressão dos briquetes de fécula de mandioca

Com relação as médias obtidas para a resistência a compressão e para a deformação utilizando a fécula de mandioca estão descritos na **Tabela 4**, também fazendo uma comparação com as concentrações de 5, 10 e 15% de aglutinante.

Tabela 4 – Tensão máxima de ruptura para diferentes concentrações de aglutinantes de FM

Concentração de Aglutinante (%)	Tensão de ruptura (N/mm ²)	Deslocamento da perturbação (%)
5%	4317,67	0,987
10%	8109,05	1,158
15%	5668,90	1,654

Fonte: (Autor, 2020)

Quando analisado os valores obtidos pela tabela 5.2, também pode-se considerar um aumento da resistência mecânica com o aumento da concentração de aglutinante também seguido de uma diminuição quando atingimos valores maiores de concentração. Dessa forma, a concentração que se obteve uma maior resistência mecânica ao pico de ruptura foi com 10% FM, porém diferentemente do AM o que se obteve o pior resultado foi o de menor concentração (5% FM). Sendo assim percebe-se que existe um ponto ótimo de resistência mecânica (sendo necessário um estudo de otimização para encontra-

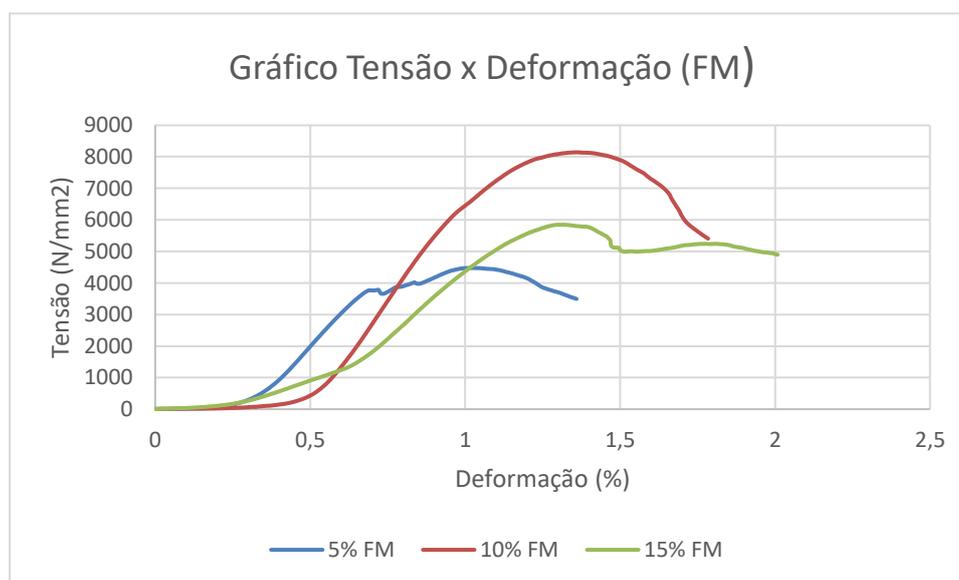
lo) não tendo uma relação linear entre aumento da resistência mecânica com o aumento da concentração de aglutinante.

Dessa forma, quando se aumenta a concentração de 5% para 10% obteve um aumento de 87,82% com relação a força de ruptura, já quando aumentamos de 10% para 15% houve uma redução de 30,09% da força de ruptura do briquete

Análogo ao amido de milho, o aumento da concentração do aglutinante proporcionou um aumento de resistência até um certo ponto (ponto de otimização), porém com o aumento de aglutinante foi gerado um briquete com maior porosidade e rugosidade, diminuindo assim sua resistência mecânica. Isso pode ser visto justamente com o aumento do deslocamento de perturbação (*Strain*) devido ao aumento da concentração de aglutinante, sendo o briquete de 15% FM com o maior deslocamento de perturbação.

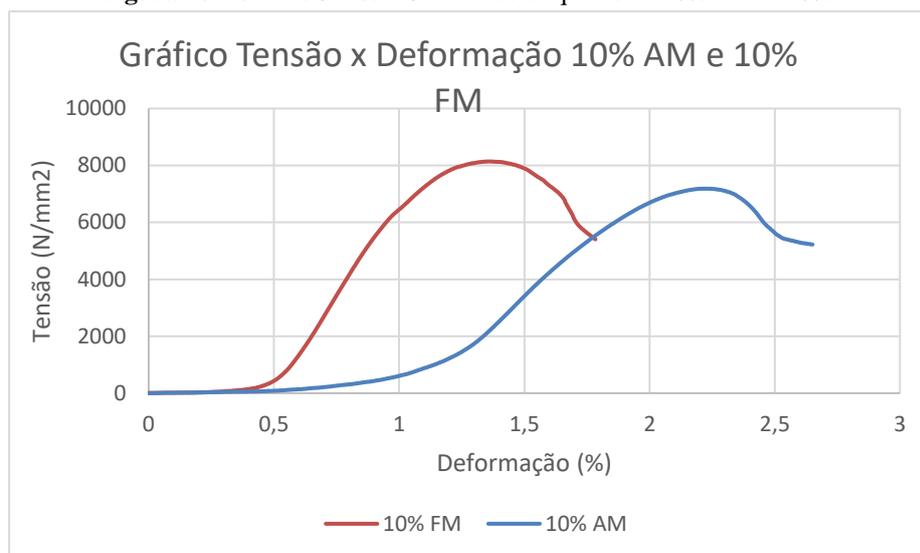
Sendo assim, também pode-se considerar o briquete de 10% como a concentração de maior resistência, podendo se observar as curvas *Stress x Strain* a partir da **Figura 15**.

Figura 15 - Curvas *Stress x Strain* dos briquetes de 5, 10 e 15% FM



Fonte: (AUTOR, 2020)

Desta forma, percebe-se que tanto para a fécula como para o amido, os resultados apresentaram uma similaridade, pois a concentração de 10% nos dois ensaios demonstrou uma melhor resistência mecânica com relação a compressão, já quando comparado os dois aglutinantes, podemos verificar que a fécula de mandioca obteve um resultado melhor. Através da **Figura 16** podemos notar esse comportamento.

Figura 16 - Curvas *Stress x Strain* dos briquetes de 10% AM e 10% FM

Fonte: (AUTOR, 2020)

5.4 Perfil de Combustão

Para essa análise, foi feito a medição da temperatura dos briquetes durante instantes de tempo, para que pudesse analisar a eficiência de queima desses briquetes. Dessa forma, foi possível analisar a eficiência dos briquetes produzidos, sendo feito uma análise com o briquete de 10% AM, 10% FM e um briquete comercial, visto que o briquete de 10% havia apresentado um melhor desempenho. Além das análises de temperatura, também foi feito uma análise visual de como esses briquete estariam queimando.

Figura 17 – Gráfico das temperaturas dos briquetes de 10% AM, 10% FM e comercial em função do tempo

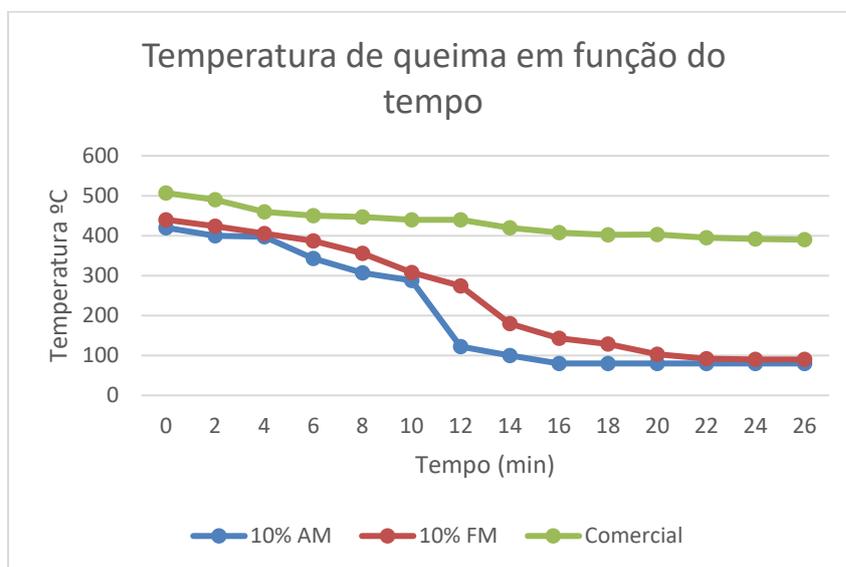


Figura 18 - Briquetes produzidos durante o aquecimento e após a medição final de temperatura



Fonte: (AUTOR, 2020)

Figura 19 - Briquetes comerciais durante aquecimento e após medição de temperatura final



Fonte: (AUTOR, 2020)

A partir da **Figura 17** foi possível analisar uma melhor eficiência de queima (Temperatura e tempo de queima) dos briquetes comerciais, isso se deve principalmente pelo aglutinante utilizado por esses carvões, eles conseguem formar uma camada de cinza que faz com que a temperatura do briquete permaneça por mais tempo sem a presença de outra fonte de calor próxima, fazendo com que o briquete tenha um maior tempo de queima. Já quando comparamos a eficiência dos briquetes de amido de milho com a fécula de mandioca, foi percebido uma eficiência similar, justamente por se tratar de aglutinantes semelhantes. Tanto o AM como a FM geraram briquetes com uma boa resistência mecânica e uma boa aglutinação, porém quando tratamos da eficiência do tempo de queima, eles já não apresentaram uma boa eficiência quando se comparado aos briquetes comerciais. Isso se deve ao fato desse carvão comercial apresentar um diferente tipo de aglutinante não divulgado pelas empresas, sendo esse o responsável por uma melhor queima.

5.5 Poder Calorífico

Este ensaio é muito importante, pois a partir dele pode-se analisar qual o comportamento do poder calorífico com diferentes aglutinantes e em diferentes concentrações e como essas variáveis podem influenciar na eficiência energética desses briquetes. Para isso foi feita análise com os dois aglutinantes em todas as 3 concentrações (5, 10 e 15%) e analisamos como que o aumento das concentrações influem nos resultados do poder calorífico. Os ensaios foram realizado em duplicata devido a limitação de recurso de oxigênio do laboratório.

Tabela 5 – Poder calorífico para briquetes de AM e FM em todas as concentrações.

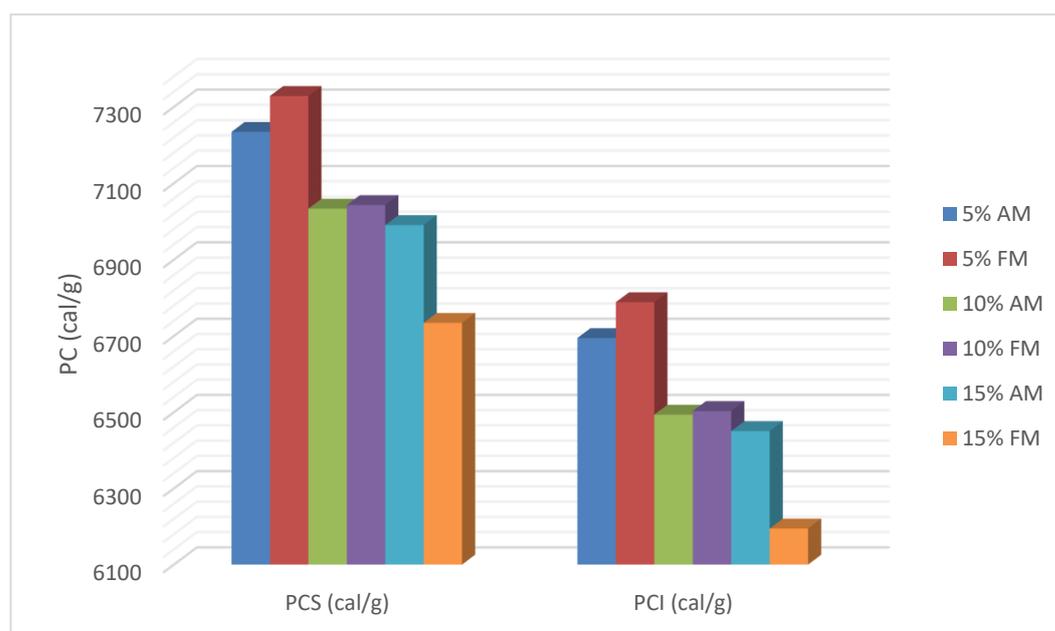
Briquete	PCS (cal/g)	PCI (cal/g)
5% AM	7234,5	6694,5
10% AM	7033,5	6493,5
15% AM	6990,5	6450,5
5% FM	7328,5	6788,5
10% FM	7043,0	6503
15% FM	6734,5	6194,5

Fonte: (AUTOR, 2020)

A partir dos dados encontrados na **Tabela 5** pode-se notar uma diminuição progressiva do poder calorífico com o aumento das concentrações de aglutinante. Isso pode ser explicado justamente pela diminuição do teor de carbono da mistura, já que teríamos um briquete com mais aglutinante e menos carvão.

Com relação aos dados pode-se identificar uma diminuição de 8,10% do poder calorífico quando se compara o briquete de 5% FM com 15% FM. Por esse fato, devemos limitar a quantidade de aglutinante para ideal, pois ela se torna uma questão limitante quando relacionado com o poder calorífico do briquete. Pode-se ter uma ideia melhor dos resultados a partir da **Figura 20**.

Figura 20 – Comparativo do poder calorífico superior e inferior com os briquetes utilizando os 2 aglutinantes em todas as concentrações (5, 10 e 15%)



Fonte: (AUTOR, 2020)

5.6 Considerações Finais

Após todos os ensaios realizados com os briquetes, nota-se a importância no estudo das propriedades físico-químicas sobre esses materiais. Esses resultados mostram como o processo de densificação exige uma preparação cuidadosa em cada etapa, afetando diretamente nos resultados seguintes. Antes da elaboração dos próprios briquetes utilizados para estes resultados, foram feitos diversos testes preliminares, para que fosse possível identificar qual a melhor forma de produção.

Vale ressaltar que algumas condições de processo como temperatura da estufa, pressão, proporção de água foram mantidas constante durante todo o processo, porém pode ser possível que algumas dessas condições afetem alguns dos resultados realizados, por isso pode ser possível um estudo posterior para que possa se analisar como essas condições afetariam com relação ao poder de queima, poder calorífico e a resistência mecânica.

6 CONCLUSÃO

Através dos resultados obtidos, podemos identificar como a tecnologia de densificação energética ainda tem muito a se desenvolver em diferentes linhas de pesquisas. Sabe-se da importância para a matriz energética de diversas indústrias ou segmentos industriais, necessitam desses materiais para sua produção. Dessa forma estudos sob condições de operação, tecnologia para novos aglutinantes, melhores matrizes e maquinário para produção são fundamentais para que essa tecnologia possa cada vez mais nos proporcionar melhores briquetes.

Quando analisado os diferentes aglutinantes em diferentes concentrações, percebe-se a influência dessas condições em diferentes aspectos físico-químicos para os briquetes. Foi interessante identificar a influência do aumento da concentração de aglutinante quando relacionado com o poder calorífico e com a resistência mecânica. Pois, com o aumento dessa concentração, pode-se notar que houve uma diminuição do poder calorífico com um aumento não progressivo da resistência mecânica. Através dos resultados pode-se analisar que tanto para o AM como para a FM a concentração de 10% apresentou melhores resultados justamente devido a esses dois fatores mais determinantes.

Com relação aos aglutinantes utilizados, quando comparado a outros briquetes já comercializados, percebe-se uma baixa eficiência desses aglutinantes (AM e FM), visto que eles não conseguiram ter uma autocombustão de forma isolada, estando relacionado a não formação de uma película para geração de calor. Dessa forma, sabe-se que esses dois tipos de aglutinantes não seriam os mais eficientes por esse fator.

Também devemos levar em conta com relação ao tipo de biomassa utilizada, pois por questões de destinação de resíduo orgânico, deve-se buscar sempre uma matéria prima que tenha um baixo valor agregado e que através de uma série de transformações podemos agregar o maior valor para essa biomassa. Seria interessante haver o estudo do efeito sob diferentes biomassas e analisar se haveria diferenças sob os resultados, como também o estudo de uma planta de produção contínua para esses briquetes, tentando identificar uma melhor eficiência de produção.

REFERÊNCIAS

- ALHO, C. J. R. The value of biodiversity. *Brazilian Journal of Biology*, v.68, n.4, Suppl., p.1115-18, 2008.
- AZEVEDO, Siderurgia e os desafios do desenvolvimento sustentável; I encontro nacional da siderurgia, IBS, 2008.
- BARCELLOS, D. C. Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo. 2007. 162 (Doutorado). Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- BISPO, M. D. (2018), Aproveitamento de Resíduos Agroindustriais de Coco e de Café Através da Pirólise: Caracterização da Fração Líquida e Aplicação Analítica do Biochar do Coco, tese de doutorado na Universidade Tiradentes – PPBI, pp 1-2.
- BOROWSKI, G. Possibilities of utilization of energy briquettes Electrical Engineering Research Report, v. 1, n. 27, p. 4, 2011.
- BRIDGWATER, A. V.; BRIDGE, S. A. A review of biomass pyrolysis and pyrolysis technologies In: BRIDGWATER, A. V. e GRASSI, G. (Ed.). Biomass Pyrolysis Liquids Upgrading and Utilization. Londres, Inglaterra: Springer Netherlands, 1991. p.11-92.
- CARVALHO, L. P. M.; POPPE, M. K. Desafios da pesquisa, desenvolvimento e inovação em biocombustíveis In: CORTEZ, L. A. B. (Ed.). Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade São Paulo - SP: Blucher, 2010. cap. 4, p.27-33.
- CINTRA, F.L.D.; RESENDE, R.S.; LEAL, M.L.S. & PORTELA, J.C. Efeito de volumes de água de irrigação no regime hídrico de solo coeso dos tabuleiros e na produção de coqueiro. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:1041-1051, 2009.
- CREPALDI, I. C.; ALMEIDA-MURADIAN, L. B. de.; RIOS, M. D. G.; PENTEADO, M. DE .V.C.; SALATINO, A. Composição nutricional do fruto de licuri (*syagrus coronata*) *Revista Brasileira Botânica*, São Paulo
- CREPALDI, I. C; ALMEIDA-MURADIAN, L. B. de.; RIOS, M. D. G.; PENTEADO, M. de V. C.; SALATINO, A. Composição nutricional do fruto de licuri (*syagrus coronata*) *Revista Brasileira botânica*, São Paulo, v. 24 n. 2, 2001.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento, 2012. Disponível em <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_12_20_16_01_51_boletimcaf_e_dezembro_2012.pdf> Acesso em 24/08/2019.
- DE MELO, V. D. P. S. Produção de briquetes de carvão vegetal com alcatrão de madeira. 2010. 64 (Mestrado). Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG.

DE OLIVEIRA, R. R. L. Moldagem de briquetes com finos de carvão vegetal aglutinados com parafina: Caracterização de algumas propriedades. 2013. 80 (Mestrado). Ciência dos Materiais, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba - SP.

DIAS, J. M. C. D. S.; SANTOS, D. T.; BRAGA, M.; ONOYAMA, M. M.; MIRANDA, C. H. B.; BARBOSA, P. F. D.; ROCHA, J. D. Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. Embrapa Agroenergia, 2012.

FAGBEMI, L.; KHEZAMI, L.; CAPART, R. Pyrolysis products from different biomasses: application to the thermal cracking of tar. *Applied Energy*, v. 69, n. 4, p. 293-306, 2001.

FFTF. Fuel from the Fields: Charcoal from Agricultural Waste. Warwickshire, Inglaterra, Reino Unido 2009

FIGUEIREDO, R. A. Caracterização dos Produtos da Pirólise da Casca de Castanha de Caju: Influência da Taxa de Aquecimento e da Temperatura 2011. 126 (Doutorado). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

FONTES, P. J. P. D.; QUIRINO, W. F.; ARAKARI, E. O. Aglutinante para briquetagem de carvão vegetal. Brasília - DF: Laboratório de produtos florestais, 1989.

LUGARINI, C.; BARBOSA, A. E. A.; OLIVEIRA, K. G. (Org.). Plano de ação nacional para a conservação da arara-azul-de-lear. 2 ed. Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, ICMBio, 2012.

MARTINS, M. P.; BENÍCIO, E. L.; JUNIOR, A. F. D.; ALMEIDA, R. B.; CARVALHO, A. M.; YAMAJI, F. M. Produção e Avaliação de Briquetes de Finos de Carvão Vegetal Compactados com Resíduo Celulósico Proveniente da Indústria de Papel e Celulose. *Revista Árvore*, v. 40, n. 1, p. 8, 2016.

MILLS, J. E. Binders for Coal Briquettes: Investigations made at fuel-testing plant St. Louis, MO. Washington Government Printing Office, 1998.

MOK, W. S. L.; ANTAL JR, M. J.; SZABO, P.; VÁRHEGYI, G.; ZELEI, B. Formation of Charcoal from Biomass in a Sealed Reactor. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 31, n. 4, p. 1162-1166, 1992.

QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal Ciências Florestais. Brasília - DF: 19 p. 1991.

ROCHA, Q. D. N. Gestão de energia de resíduos de biomassa: Otimização da distribuição geográfica das unidades industriais de geração de energia. 2011. 108 (Engenheiro Mecânico). Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

ROCHA, L. G. Dossiê Técnico: Aproveitamento de resíduos agroindustriais. CETEC, F. C. T. D. M. G. Minas Gerais - MG: Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas 2011.

SAFARI SINEGANI AA, Emtiazi G, Shariatmadari H. Sorption and immobilization of cellulase on silicate clay minerals. *J Colloid Interface Sci*. 2005;

SCHUILING, M.; HARRIES, H.C. The Coconut Palm in East Africa. Principes,

VENDRASCO, L.; YAMAJI, F. M. Normas técnicas nas indústrias brasileiras de briquetes. <https://uspdigital.usp.br/siicusp/>, p. Anais do Simpósio Internacional de Iniciação Científica - 17, 2009.

VIEIRA, Wedja Timóteo. Caracterização cromatográfica e avaliação da atividade antimicrobiana do extrato pirolenhoso obtido a partir de biomassas residuais. 2019. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2019.

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

ZANELLA, Karine. Produção de briquetes de carvão vegetal por meio do beneficiamento do bagaço da laranja (*Citrus Sinensis*). 2018. 1 recurso online (134 p.). Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP.