

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

FABIANO PEREIRA NEVES DO NASCIMENTO

**PIRÓLISE DE SABUGO DE MILHO EM REATOR DE LEITO FIXO PARA
PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO**

PALMAS

2022

FABIANO PEREIRA NEVES DO NASCIMENTO

**PIRÓLISE DE SABUGO DE MILHO EM REATOR DE LEITO FIXO PARA
PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO**

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

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza

**PALMAS
2022**

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

N244p Nascimento, Fabiano Pereira Neves do
Pirólise de sabugo de milho em reator de leito fixo para produção de
carvão ativado / Fabiano Pereira Neves do Nascimento. – Palmas, TO, 2022.
44 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) –
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus
Palmas, Palmas, TO, 2022.

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

1. Sabugo de milho. 2. Pirólise. 3. Carvão ativado. I. Pedroza, Marcelo
Mendes. II. Título.

CDD 624

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

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

FOLHA DE APROVAÇÃO

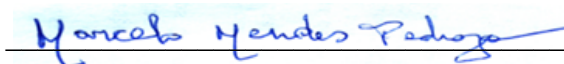
FABIANO PEREIRA NEVES DO NASCIMENTO

PIRÓLISE DE SABUGO DE MILHO EM REATOR DE LEITO FIXO PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO

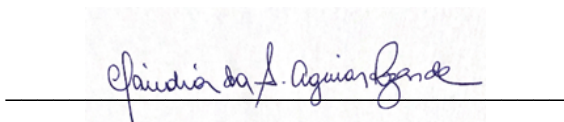
Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Coordenação do curso de Engenharia Civil
Instituto Federal do Tocantins - Campus Palmas,
como exigência à obtenção do grau em
Engenheiro Civil.

Aprovado em: 14 / 12 / 2022

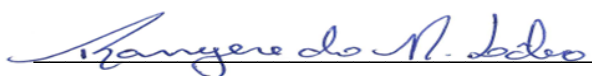
BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza
Orientador



Prof. Dra. Cláudia da Silva Aguiar Rezende



M.e Ranyere do Nascimento Lôbo

“A mente que se abre a uma nova ideia,
jamais voltará ao seu tamanho original.”

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me abençoar e iluminar o meu caminho, sempre me dando forças e perseverança a cada desafio.

A minha família, meus pais, Gidelson e Sileine, ao meu irmão, Thiago e a minha avó, por sempre me apoiarem e ajudarem de todas as formas possíveis durante a jornada.

Aos professores, que contribuíram bastante para o meu crescimento, especialmente ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza, que me guiou nessa etapa tão importante, com muito apoio, calma e dedicação para que fosse possível finalizar este trabalho. Agradeço tão quanto a banca, pelas análises e sugestões que contribuíram para modelar o trabalho e torná-lo mais útil para as pessoas.

Por fim, agradeço a todos meus amigos e colegas que contribuíram de alguma forma, direta ou indiretamente, para realização deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo, estudar o processo de degradação térmica de sabugo de milho visando a obtenção de adsorvente, carvão ativado, em reator de leito fixo. A biomassa em estudo, sabugo de milho, e os produtos geradores por meio da pirólise em reator, carvão ativado, foram analisados através de métodos gravimétricos clássicos, ou seja, análise imediata, densidade e cinética de secagem. No processo de pirólise em reator de leito fixo, foram estudados os seguintes parâmetros: temperatura (550°C e 650°C), taxa de aquecimento (30°C/min) e tempo de duração de 30 minutos. A biomassa apresentou as seguintes características: (a) teor de cinzas de 2,08%, (b) material volátil igual a 73,08% e (c) carbono fixo de 12,66%. Vale frisar que, quanto maior os valores obtidos de teor de material volátil, maior será o poder de reação da biomassa, pois ele é diretamente ligado ao poder de ignição do material. A biomassa estudada apresentou altos teores de materiais voláteis e carbono fixo, o que indica a possibilidade do uso desse material na fabricação de itens carbonáceos. No teste de cinética de secagem, foi possível observar que o peso da amostra submetida à secagem em 40°C permaneceu constante, mostrando assim, que ocorreu secagem completa do material. Sendo assim, para o período de secagem de 23 horas, o percentual de perda de massa para a temperatura de 40 °C foi de 65%. Os rendimentos das frações sólidas provenientes da pirólise, carvão ativado, não tiveram grande disparidade, sendo que, para temperatura de 550°C com taxa de aquecimento de 30 °C/min e tempo de pirólise de 30 minutos, ele foi de 26,96%. Enquanto para a temperatura de 650°C, com a mesma taxa de aquecimento e tempo de pirólise, o rendimento foi de 22,69%. O carvão ativado obtido a 550°C apresentou as seguintes características: (a) umidade = 3,97%, (b) materiais voláteis = 23,02%, (c) teor cinzas = 8,20%, (d) carbono fixo = 64,80% e (e) número de iodo = 347,79 mgI₂/g, o que aponta a utilização dessa biomassa para a produção de material adsorvente.

Palavras-chaves: Sabugo de milho. Pirólise. Carvão ativado.

ABSTRACT

The objective of this work is to study the process of thermal degradation of corn on the cob in order to obtain an adsorbent, activated carbon, in a fixed bed reactor. reactor, activated carbon, were analyzed using classical gravimetric methods, that is, immediate analysis, density and drying kinetics. In the pyrolysis process in a fixed bed reactor, the following parameters were studied: temperature (550°C and 650°C), heating rate (30°C/min) and duration of 30 minutes. The biomass had the following characteristics: (a) ash content of 2.08%, (b) volatile material equal to 73.08% and (c) fixed carbon of 12.66%. It is worth emphasizing that the higher the values obtained for volatile material content, the greater the reaction power of the biomass, as it is directly linked to the ignition power of the material. The biomass studied showed high levels of volatile materials and fixed carbon, which indicates the possibility of using this material in the manufacture of carbonaceous items. In the drying kinetics test, it was possible to observe that the weight of the sample subjected to drying at 40°C remained constant, thus showing that the material had completely dried. Thus, for the drying period of 23 hours, the percentage of mass loss for the temperature of 40 °C was 65%. The yields of solid fractions from pyrolysis, activated carbon, did not show great disparity, and for a temperature of 550°C with a heating rate of 30°C/min and a pyrolysis time of 30 minutes, it was 26.96 %. While for the temperature of 650°C, with the same heating rate and pyrolysis time, the yield was 22.69%. Activated charcoal obtained at 550°C had the following characteristics: (a) moisture = 3.97%, (b) volatile materials = 23.02%, (c) ash content = 8.20%, (d) fixed carbon = 64.80% and (e) iodine number = 347.79 mgI₂/g, which indicates the use of this biomass for the production of adsorbent material.

Keywords: Corn cob. Pyrolysis. Activated charcoal.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de milho no Brasil por regiões.....	5
Tabela 2 - Análise imediata de biomassas diversas: (a) SM: Sabugo do Milho, (b) PD: Poda de Árvore, (c) BC: Bagaço de Cana e (d) FC: Fibra de Coco.....	22
Tabela 3 - Densidade volumétrica aparente do sabugo de milho.....	24
Tabela 4 - Análise imediata do carvão.....	27
Tabela 5 - Densidade aparente do carvão do sabugo do milho.....	28
Tabela 6 - Resultado do índice de iodo do carvão ativado (<i>Zea mays L</i>).....	30

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Partes constituintes do Sabugo de Milho.....	8
Figura 2 - Fluxograma de evolução da metodologia.....	14
Figura 3 - Estufa de secagem e esterilização (SL -100) e Secagem da biomassa.....	14
Figura 4 - Triturador e biomassa após peneiração.....	15
Figura 5 - Densidade aparente do sabugo de milho.....	16
Figura 6 - Forno mufla.....	17
Figura 7 - Briquete obtido do sabugo de milho.....	19
Figura 8 - Reator de leito fixo tubular de quartzo.....	20
Figura 9 - Autoclave vertical.....	20
Figura 10 - Fração sólida obtida através do processo de pirólise do sabugo de milho.....	21
Figura 11 - Densidade do sabugo do milho.....	25
Figura 12 - Cinética do Sabugo do Milho à 40 °C.....	25
Figura 13 - Densidade do carvão ativado.....	29

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	03
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA.....	04
1.2	JUSTIFICATIVA.....	04
1.3	OBJETIVOS.....	07
1.3.1	Objetivo Geral.....	07
1.3.2	Objetivos Específicos.....	07
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	08
2.1	Sabugo de milho	08
2.2	Biomassa	09
2.3	Pirólise	09
2.4	Pirólise de Sabugo de Milho	10
2.5	Carvão Ativado	11
2.6	Experiências da Pirólise de Resíduos do Milho	11
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	13
3.1	Coleta dos resíduos e preparo de amostras	13
3.2	Caracterização Da Biomassa	15
3.2.1	Cinética de secagem do sabugo do milho <i>in natura</i>	15
3.2.2	Densidade aparente	15
3.2.3	Teor de cinzas	16
3.2.4	Teor de umidade	17
3.2.5	Material Volátil	18
3.2.6	Teor de carbono fixo - CF.....	18
3.3	Elaboração de briquetes da biomassa do Sabugo do Milho em pó	18
3.4	Pirólise em reator de leito fixo	19
3.5	Caracterização do Carvão Ativado	20
3.5.1	Densidade Volumétrica Aparente do Carvão	21
3.5.2	Teor de Cinzas, Teor de umidade, Material Volátil e Teor de Carbono Fixo	21
3.5.3	Cálculo do Índice de Iodo	21
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	22
4.1	Caracterização da Biomassa	22
4.1.1	Análise Imediata	22
4.1.2	Densidade Aparente	24

4.1.3	Estudo Cinético de secagem do sabugo de milho <i>in natura</i>	25
4.2	Rendimentos do carvão ativado obtido durante a pirólise do sabugo de milho	26
4.3	Caracterização do Carvão Ativado	26
4.3.1	Análise Imediata do Carvão Ativado	27
4.3.2	Densidade Aparente do carvão	28
4.3.3	Índice de Iodo	29
5	CONCLUSÕES	30
	REFERÊNCIAS	32

1 INTRODUÇÃO

Recentemente, com o contínuo aumento significativo dos problemas ambientais e a preocupação em relação ao aquecimento global, devido ao descarte inapropriado de resíduos, acaba-se crescendo a busca por outras alternativas de usos para esses resíduos. Tendo isso em vista, um recurso que vem sendo utilizado cada vez mais é a biomassa. Segundo Zhang *et al.* (2008) ao se comparar com outras fontes de energia baseados em carbono, a biomassa é uma fonte de energia renovável neutra em carbono.

Por conseguinte, o ponto que temos é que a biomassa já representa uma grande fonte de energia ao mundo. De acordo com Demiral *et al.* (2011), ela ocupa o posto de quarta maior fonte de energia do mundo, onde cerca de 38% dos países desenvolvidos já a têm como energia de consumo primária. Baseado nisso, uma alternativa de biomassa com grande potencial energético que vem sendo utilizada é o sabugo de milho, pois possui uma grande abundância em muitos países, atrelada a uma facilidade de aquisição, o que o torna um recurso muito atrativo.

No quesito de produção de milho, o Brasil é terceiro maior do mundo, ficando atrás apenas dos Estados Unidos e China. Estes produtores, unidos à União Européia, Argentina e Ucrânia concentram 78% da produção do planeta, que corresponde a cerca de 1,118 bilhão de toneladas, enquanto a estimativa de consumo é de 1,132 bilhão. (COELHO, 2019 apud USDA, 2019). E vale dizer que, essa produção vem crescendo e crescerá cada vez mais no decorrer dos anos.

Levando isso em conta, vale frisar que o cultivo de uma cultura consequentemente acarreta na produção de resíduos como cascas, caroços, sementes, ramas, bagaços e outros. De acordo com Cao *et al.* (2003), para cada 100 kg de espigas de milho, aproximadamente 18 kg são formados pelo sabugo de milho. Porém, apesar da grande quantidade gerada desse subproduto, a variedade de utilização ainda não se mostra compatível com seu potencial de uso (SULTANA; ANWAR; PRZYBYLSKI, 2007).

Tendo em consideração os problemas causados pelo descarte incorreto desses resíduos, métodos foram criados com o intuito de os destinar de forma ambientalmente correta e segura. Um desses métodos é a conversão termoquímica, a pirólise, onde o resíduo é

convertido em bioprodutos (bio-óleo, carvão ativado, extrato ácido e biogás), potencialmente mais valiosos.

Atrelando a esses fatores, uma vez que o método de fabricação de carvão ativado a partir de sabugo de milho apresenta vantagens como operação viável e agregação de valor, esta forma de tratamento térmico passa a ser considerada por muitos (ATES; ISIKDAG, 2009). Vale ressaltar também que, o carvão ativado proporciona alguns benefícios como, tratamento de efluentes e de água, tratamento e purificação de soluções açucaradas, remoção de gosto, odor e cor de componentes, entre outros (MACHADO, 2019).

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo avaliar a eficácia dos resíduos da produção de milho como fonte de bioprodutos (carvão ativado) de alto valor agregado, por meio da pirólise, bem como utilização do adsorvente obtido durante a degradação térmica na adsorção de constituintes indesejáveis na água.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

O milho é a segunda maior cultura agrícola cultivada no Brasil e está entre as mais produzidas no mundo. Essa enorme produção conseqüentemente gera um grande volume de resíduos de sabugo de milho. De acordo com Cao *et al.* (2003), existe uma grande relação entre espiga de milho e o sabugo de milho, sendo ela cerca de 100:18, onde para cada 100 kg de espiga de milho, temos 18 kg de sabugo. Desse percentual de resíduos, pouco é utilizado para produção de itens de alto valor agregado, sendo a maior parte destinada como combustíveis de baixa qualidade ou simplesmente descartados, o que faz com que seja necessária uma busca por alternativas ambientais para esse resíduo. Diante dessa problemática, qual a possibilidade do uso do resíduo de sabugo de milho através do processo de pirólise para produção de carvão ativado?

1.2 JUSTIFICATIVA

De acordo com Bartocci *et al.* (2018), o mundo tem exigido cada vez mais a implementação de tecnologias verdes, que prejudiquem menos o meio ambiente. O uso de recursos provenientes de biomassa e resíduos de energia renovável são promissores. Pode-se

notar que toda matéria orgânica pode ser pirolisada e tem uso em todo o planeta. Dessa forma, para o Brasil não seria diferente, através do processo termoquímico da pirólise, uma maneira ambientalmente correta de diversificar a energia seria implementada, sendo até mesmo possível a diminuição dos impactos ambientais, além de que, seria possível obter o carvão ativado, um produto de alto valor econômico.

Vale evidenciar que, a produção nacional de milho em 2019 foi de 97 milhões de toneladas, a segunda maior cultura, representando aumento de 20,2 % ou 16,3 milhões de toneladas em relação à safra de 2018, totalizando 17,3 milhões de hectares plantados, 4,2% superior à safra 2017/2018. (COELHO, 2019 apud CONAB, 2019). Na região norte foi semelhante o crescimento, onde a produção de milho em 2019 foi de 2,8 milhões (Tabela 1) de toneladas, representando um aumento de 17%.

Tabela 1 – Produção de milho no Brasil por regiões

REGIÃO	2016/17 (ton)	2017/18 (ton)	2018/19 (ton)
NORTE	2.702,10	2.446,70	2.852,40
NORDESTE	6.681,30	6.445,80	6.705,70
CENTRO-OESTE	48.873,70	41.451,20	51.068,40
SUDESTE	12.447,90	11.129,40	11.646,80
SUL	27.137,80	19.236,50	24.737,10
BRASIL	97.842,80	80.709,50	97.010,40

Fonte: COELHO (2019).

Em congruência a isso, a pirólise de sabugo de milho para a obtenção do carvão ativado, se apresenta como uma importante alternativa de aproveitamento desse resíduo. Dessa forma, no presente estudo, procurou-se avaliar as condições experimentais satisfatórias para obtenção do carvão, com o objetivo de contribuir com ações de pesquisas voltadas à sustentabilidade e ao desenvolvimento regional.

O interesse no carvão ativado é algo que vem crescendo bastante devido a sua alta capacidade de adsorção e as mudanças que ocorreram no decorrer dos últimos anos nos parâmetros das agências reguladoras de serviços de abastecimento de água. Não se pode esquecer que, a fabricação de alguns adsorventes são de elevado custo devido à origem, assim

sendo, a atual pesquisa visa uma alternativa de se empregar uma matéria prima de baixo custo substituindo as convencionais, para a obtenção desse adsorvente.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Estudar o processo de degradação térmica de sabugo de milho visando a obtenção de adsorvente em reator de leito fixo.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar a biomassa residual;
- Efetuar a pirólise de sabugo de milho em reator de leito fixo para a produção de carvão ativado;
- Determinar as características do material obtido durante o processo térmico.

2 REVISÃO DE LITERATURA

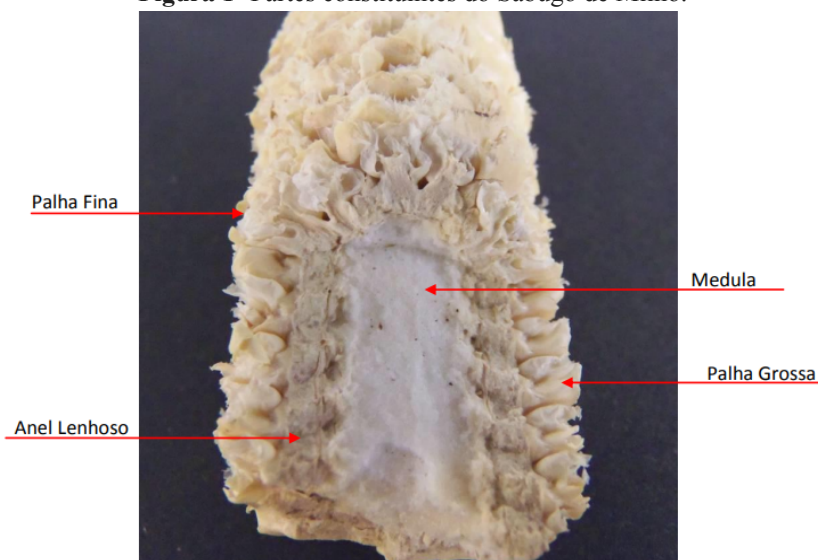
2.1 Sabugo de Milho

O milho pertence à família das poáceas, uma espécie anual, estival, cespitosa, ereta, com baixo afilamento, e com ampla adaptação a diferentes condições ambientais, utilizado na alimentação humana e animal, principalmente devido às suas propriedades nutricionais (MACHADO, 2019).

O processamento do milho gera um grande volume de resíduos, dentre eles o sabugo ocupa percentual significativo. O sabugo de milho, que pode ser utilizado como fonte de biomassa renovável na produção de açúcares solúveis, através de processos químicos, enzimáticos e fermentativos fornecem combustíveis líquidos e uma variedade de produtos químicos (CASTRO e PEREIRA JR, 2010).

O sabugo de milho (Figura 1) é a parte central da espiga de milho, onde estão presos os grãos de milho. Ziglio *et al.* (2007) observou que a estrutura do sabugo de milho é formada por 4 partes distintas: palha fina, parte externa do sabugo que corresponde a 4,1 % da sua massa; palha grossa, camada interna à palha fina e representa 33,7 % do peso do sabugo; anel lenhoso, localiza-se no interior do sabugo com 60,3 %, recobrindo a medula, núcleo central do sabugo, com 1,9 % do peso total. Vale ressaltar ainda que, essas partes e proporções podem variar conforme o cultivo (ZIGLIO *et al.*, 2007).

Figura 1- Partes constituintes do Sabugo de Milho.



Fonte: RAMOS (2013)

2.2 Biomassa

Biomassa se refere a todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica, seja vegetal ou animal, constituído de cinco componentes principais: lipídios, carboidratos, celulose, hemicelulose e lignina (CHERUBINI; STROMMAN, 2011). De acordo com Higman e Van der Burgt (2003), biomassa em outros termos é: “qualquer combustível ou matéria bruta derivados de organismos que estiveram vivos recentemente”. Dentre os materiais que são considerados biomassas podemos citar os detritos florestais e animais, os resultantes da agricultura e processos industriais, madeira, casca de arroz, bagaço da cana de açúcar, sabugo de milho e até mesmo algas (FONSECA, 2009).

Conforme Avelar (2013), os materiais utilizados para a construção da biomassa ela apresenta concentrações variadas de celulose, hemicelulose e lignina, que são importantes para os processos de produção de produtos químicos e combustíveis renováveis. A biomassa moderna que é “aquela produzida de forma sustentável e utilizada para geração de eletricidade, produção de calor e combustíveis líquidos veiculares” (FONSECA, 2009). Este tipo pode se tornar uma fonte de energia para os próximos anos, menos poluente, sustentável e renovável.

2.3 Pirólise

Lora *et al.* (2012) define pirólise como “um processo de degradação termoquímica que ocorre quando se aplica calor a uma substância ou material, em ausência de oxidante” sendo um processo endotérmico por usar uma fonte de calor externa. A pirólise, portanto, pode ser descrita como a decomposição dos componentes orgânicos da biomassa por meio do calor na ausência de oxigênio, com o fim de produzir derivados líquidos, sólidos e gases combustíveis, alguns comerciáveis como solventes, produtos químicos e matéria prima (KLASS, 1998).

Para Bridgwater *et al.* (2008), na pirólise a biomassa é aquecida a temperaturas entre 500-800°C, formando um resíduo sólido rico em carbono (carvão) e uma fração volátil composta de gases e vapores orgânicos condensáveis (licor pirolenhoso), cujas proporções dependem do método de pirólise empregado, dos parâmetros do processo e das características

do material a ser tratado. As baixas temperaturas do processo e tempos de residência de vapor mais longos favorecem a produção de carvão enquanto as altas temperaturas e maior tempo de residência aumenta a conversão de biomassa para gás e temperatura moderada e curta residência de vapor tempo são ideais para a produção de líquidos (BRIDGWATER, 2003).

Segundo Bridgwater (2003), a pirólise é um processo atrativo, pois possui uma operação simplificada além de um custo reduzido. Nos últimos anos, o processo de pirólise tem recebido bastante atenção, pois produz energia tanto na forma sólida, quanto nas formas líquidas e gasosas da biomassa (BARTOCCI *et al.*, 2018; YANG *et al.*, 2006)

2.4 Pirólise de Sabugo de Milho

A taxa de aquecimento da pirólise de um produto é influenciada pela estrutura física, composição, tamanho e forma. Todavia, conforme Cao *et al.* (2004) a temperatura final de pirólise é mais importante nos rendimentos e composição do produto final do que a taxa de aquecimento ou o tamanho das partículas. Essa dependência dos rendimentos em relação à temperatura é demonstrada na sua pesquisa, onde pode-se observar que baixos rendimentos de carvão foram obtidos em altas temperaturas e vice-versa.

Ates e Isikdag (2009) observaram que quando a temperatura de pirólise foi aumentada de 300 para 800 °C, os rendimentos de carvão mostraram uma diminuição na faixa de 30,5 a 25,4%. Uma vez que os produtos de pirólise da biomassa começam a se formar em torno de 300 °C, os mecanismos de decomposição da biomassa ainda não se completam nesta temperatura, razão pela qual alto rendimento de carvão tem sido obtido em baixas temperaturas. O grau pirolítico da espiga de milho depende, portanto, criticamente da temperatura, sendo que quanto maior a temperatura, maior o rendimento de gases emitidos e menor a quantidade de resíduo líquido e sólido.

A temperatura de pirólise é um parâmetro de grande influência nos rendimentos dos produtos de pirólise, sendo a análise termogravimétrica muito usada na sua investigação experimental (CERANIC *et al.* 2016). Conforme experimento feito por Ceranic *et al.* (2016) a faixa de temperatura durante a investigação do processo de pirólise da espiga de milho foi de 20 a 650 °C. A 150 °C, o processo de decomposição foi lento, já na faixa de 150 a 400 °C o rendimento do carvão diminuiu significativamente à medida que a temperatura aumentou,

sendo que sua decomposição continuou lenta até o final do experimento. (CERANIC *et al.* 2016) também verificou que a massa de 10 g permanece inalterada nos primeiros 8 minutos, e à medida que o processo de pirólise continuou houve perda significativa de massa na proporção de 62,7 a 70,8% entre 12 e 16 minutos.

A investigação experimental da pirólise da espiga de milho feita por Cao *et al.* (2004) produziu de 25%–42% de gás, 35%–41% de óleo de pirólise e 26%–32% de carvão (rendimentos de massa) dentro da faixa de temperatura de 350–600 °C. Worasuwannarak *et al.* (2007) estabeleceram através de investigação experimental que o rendimento do carvão a 600 °C é de 19%.

2.5 Carvão ativado

O carvão vegetal é uma estrutura carbônica, que pode ser submetida a processos de ativação para adquirir, principalmente, a melhoria da propriedade de adsorção, causada pelo aumento da área superficial de suas partículas (GREENBANK; SPOTTS, 1995). Após este processo, o carvão ativado pode ser usado em “processos industriais de descoloração, tratamento de efluentes e de água, tratamento e purificação de soluções açucaradas, anestésicos, antibióticos, álcoois e na remoção de sabores e odores de alimentos” (GREENBANK; SPOTTS, 1995).

Dentre as características importantes do carvão ativado (CA) se tem, baixa reatividade térmica, resistência a variação de pH e boa relação custo-benefício. (ALBUQUERQUE JÚNIOR *et al.*, 2008a, 2008b). Sua estrutura interna é formada por associações de anéis aromáticos, heterocíclicos e grupos de carbono, oxigênio e hidrogênio (BINIAK, SWIATKOWSKI E PAKULA, 2001). Segundo o mesmo autor, a estrutura porosa do carvão ativado, com poros de diversos tamanhos, é a responsável pelo seu potencial de adsorção.

2.6 Experiências da Pirólise de Resíduos do Milho

Mullen *et al.* (2010) realizaram a pirólise rápida de dois resíduos de milho, espigas de milho e palha de milho, definido no trabalho como caules, folhas e cascas sem

espigas, para produção de bio-óleo e biocarvão em reator de leito fluidizado, com o intuito de verificar as propriedades de correção do solo. A pirólise foi realizada em um leito fluidizado borbulhante de quartzo areia a temperaturas de cerca de 500 °C. Dessa forma concluíram que, o biocarvão é potencialmente uma valiosa correção do solo porque contém a maior parte do mineral nutrientes nos resíduos de milho, é um bom absorvente de nutrientes e agroquímicos. E que a aplicação de biocarvão para o solo pode resolver vários problemas ambientais importantes, problemas associados com a remoção de resíduos da cultura do milho do campo e, assim, aumentar a sustentabilidade da colheita de biomassa e produção de biocombustíveis.

Chen *et al.*, (2014) estudaram a espiga de milho e o óleo de forma co-pirolisados em leito fixo nas temperaturas de 500°C, 550°C, 600°C, sob atmosfera de nitrogênio, com o intuito de verificar se a biomassa poderia produzir maiores rendimentos de bio-óleo e mais hidrocarbonetos, bem como menos componentes de oxigênio do que a pirólise de biomassa pura. Os produtos de co-pirólise foram investigados com foco nos aspectos físicos e químicos e os resultados mostram que 550°C parece ser a temperatura ideal considerando os rendimentos máximos do bio-óleo e suas propriedades. A Co-pirólise de espiga de milho e óleo usado produziu maior quantidade de líquido e menor quantidade de resíduo sólido do que a pirólise da espiga de milho exclusivamente. Dessa maneira, é possível concluir que o bio-óleo tem potencial para ser um combustível alternativo para o motor depois de atualizado pelo zeólito HY.

Tang *et al.* (2016) realizaram experimentos operacionais conduzidos para otimizar a preparação de carvões ativados de milho espiga. A capacidade de adsorção de Cr (VI) dos carvões ativados produzidos também foi avaliada e o impacto da dosagem de adsorvente, tempo de contato, pH inicial da solução e temperatura foram estudados. Os resultados mostraram que o carvão ativado de sabugo de milho apresentou boa capacidade adsorptiva de Cr (VI); a adsorção máxima teórica foi de 34,48 mg / g⁻¹ a 298 K. O valor de adsorção Brunauer-Emmett-Teller e iodo do carvão ativado produzido pode ser 924,9 m² / g e 1,188 mg / g, respectivamente. Sob a concentração inicial de Cr (VI) de 10 mg L⁻¹ e pH inicial de 5,8, um equilíbrio de adsorção foi alcançado após 4 h, e a taxa de remoção de Cr (VI) foi de 78,9 a 100 % com uma dose de adsorvente aumentada de 0,5 a 0,7 g L⁻¹. Os dados de cinética e equilíbrio concordaram bem com o modelo de cinética de pseudo-segunda

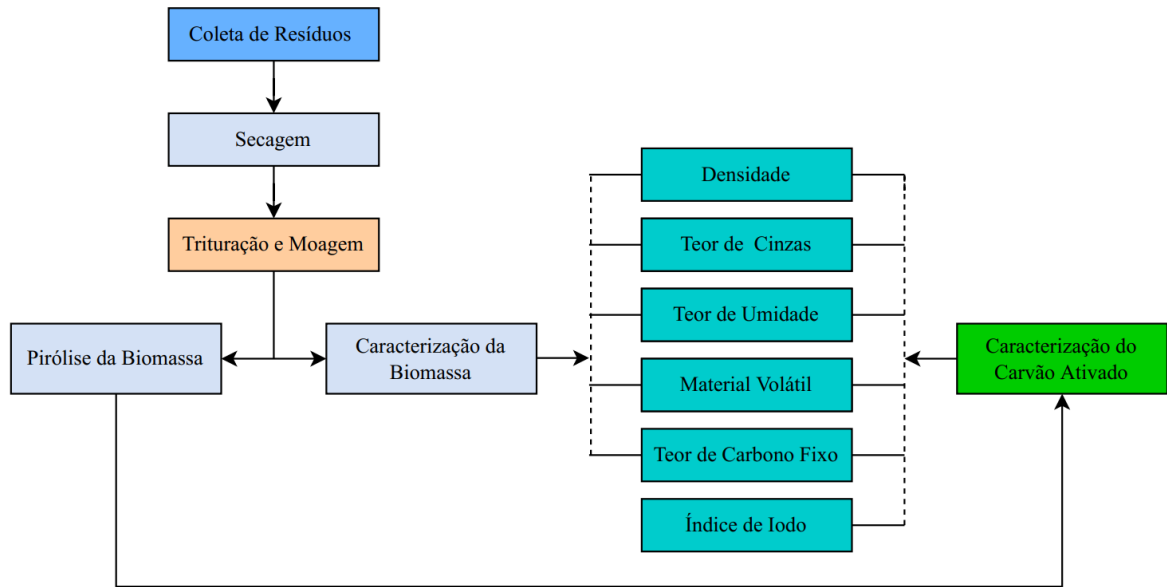
ordem e com o modelo de isoterma de Langmuir. Já a capacidade de adsorção de equilíbrio melhorou com o aumento da temperatura.

Ceranic *et al.* (2016) investigaram de forma experimental o processo de pirólise da espiga de milho da Voivodina (República da Sérvia). Os fatores estudados foram a temperatura, o tempo de reação, o tamanho da partícula e a taxa de aquecimento nos rendimentos dos produtos de pirólise. De acordo com o que foi estudado, foi possível observar que o aumento da temperatura levou à diminuição do rendimento do carvão e rendimento volátil, e que o rendimento de massa do óleo de pirólise aumentou com maior aquecimento. A fração volumétrica de metano no gás de pirólise aumentou com a temperatura, enquanto a fração volumétrica de dióxido de carbono diminuiu. O tamanho da partícula afetou a produção de metano e foi demonstrado que, com o aumento do tamanho das partículas, a fração volumétrica de metano no gás de pirólise diminuiu. Baseado no caráter da composição obtida após o processo de pirólise da espiga de milho, determinou-se que o carvão é rico em carbono (74,80%). Foi possível concluir também que, o alto poder calorífico do carvão contribui para a justificativa econômica da aplicação na pirólise do sabugo de milho.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 Coleta dos resíduos e preparo de amostras

O resíduo que foi empregado no presente trabalho, é o sabugo do milho (*Zea mays L*) *in natura*, proveniente dos processos de produção e utilização do milho. Todos os resíduos utilizados para experimentos e análises foram coletados na Fazenda Santo Expedito, um grande fornecedor para Palmas-TO, localizada no município de Aparecida do Rio Negro, no estado do Tocantins. Na Figura 2, fica evidenciado como se desenrolou a evolução dos procedimentos empregados nesta pesquisa.

Figura 2 - Fluxograma de evolução da metodologia.

Fonte: Autor (2022)

Após a coleta dos resíduos foi efetuada a secagem dos mesmos por meio da Estufa de Secagem e Esterilização (SL -100), conforme Figura 3, à 60 °C durante 24 horas, no laboratório de Inovação e Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN), do Instituto Federal do Tocantins – IFTO/Campus Palmas.

Figura 3 - Estufa de secagem e esterilização (SL -100) e Secagem da biomassa.

Fonte: Autor (2022)

Esse processo foi seguido pelas etapas de trituração e moagem, Figura 4, para garantir a homogeneização da biomassa e auxiliar no processo de caracterização, e peneiração em peneira com abertura de 1,41 mm (ABNT, Mesh 14).

Figura 4 - Triturador e biomassa após peneiração.



Fonte: Autor (2022)

3.2 Caracterização Da Biomassa

3.2.1 Cinética de secagem do sabugo do milho *in natura*

Para verificação de variações de massas decorrente da perda de água e materiais voláteis, foi realizada a cinética de secagem do sabugo do milho *in natura* em triplicata, por meio da estufa (Figura 3), na qual as amostras foram analisadas pelo mesmo intervalo de tempo na temperatura de 40°C.

3.2.2 Densidade aparente

Para o cálculo da densidade aparente, foi necessário acoplar uma proveta de 100 mL a uma balança de precisão, Figura 5. Em seguida, tarou-se a balança e se adicionou a

biomassa de sabugo de milho *in natura*, já previamente seca e em forma de pó. Com isso, foi obtida a densidade aparente por meio da Equação 1.

$$\text{Densidade} \left(\frac{g}{mL} \right) = \left[\frac{m(g)}{V(mL)} \right] \quad (\text{Equação.1})$$

Figura 5 - Densidade aparente do sabugo de milho.



Fonte: Autor (2022)

3.2.3 Teor de cinzas

O teor de cinzas foi obtido, conforme método de Sanchez *et al.*, (2009), pela calcinação de 1g de sabugo de milho em cadinhos de porcelana de pesos constantes e pré-determinados. A amostra é calcinada a 710°C por 30 minutos em um forno mufla (Figura 6).

Figura 6 - Forno mufla.



Fonte: Autor (2022)

Após a amostra esfriar por 1 hora foi feita a pesagem e determinado o teor de cinzas pela Equação 2. A análise foi feita em triplicata.

$$Cinzas (\%) = \frac{(A-B)}{(C)} * 100 \quad (\text{Equação.2})$$

A= massa do cadinho + massa amostra após calcinação

B= massa do cadinho vazio

C= massa da amostra

3.2.4 Teor de umidade

O teor de umidade foi determinado de modo semelhante ao teor de cinzas. Uma amostra de 1 g de sabugo de milho foi posta em um cadinho de peso constante e pré-determinado, sendo aquecida durante uma hora a 105°C. Posteriormente, a amostra foi posta em um dessecador por 15 minutos e aferida a massa. Após análise em triplicata, o teor de umidade foi obtido de acordo com a Norma ASTM D 3173-85 pela Equação 3:

$$Umidade (\%) = \frac{(A-B)}{(C)} * 100 \quad (\text{Equação.3})$$

A= massa do cadinho vazio + massa da amostra

B= massa do cadinho + massa amostra pós-aquecimento na estufa

C= massa da amostra

3.2.5 Material Volátil

A massa volátil do sabugo do milho também foi definida pelo método sugerido por Sanchez *et al.*, (2009), em triplicata com amostras de 1g de cadinhos de porcelana. As amostras foram aquecidas à temperatura de 850°C em um forno mufla (Figura 6), sem oxigênio, por 30 minutos. O teor foi definido conforme apresenta a Equação 4:

$$\text{Material Volátil (\%)} = \left(\frac{A-B}{C} \right) * 100 \quad (\text{Equação.4})$$

A= massa do cadinho vazio + massa da amostra

B= massa do cadinho + massa amostra pós-aquecimento em forno mufla

C= massa da amostra

3.2.6 Teor de carbono fixo-CF

O teor de carbono fixo foi determinado pela diferença de 100% menos o teor de cinzas, de umidade e material volátil, conforme a Equação 5:

$$\text{Carbono Fixo (\%)} = 100 - [\text{Umidade(\%)} - \text{Cinzas(\%)} - \text{Material Volátil(\%)}] \quad (\text{Equação.5})$$

3.3 Elaboração de briquetes da biomassa do Sabugo do Milho em pó

Foram fabricados briquetes (Figura 7), blocos densos e compactos, a partir de 320 mL de sabugo de milho *in natura*, já triturado, moído, seco e peneirado. A fabricação deu-se por meio da hidratação de aproximadamente 80 g de material com 70 mL de água destilada. Essa amostra ficou em repouso por 30 minutos e foi prensada em tubulações de 20

cm de comprimento e 32 mm de diâmetro. Os briquetes formados foram secos em estufa por 24 horas a 40°C.

Figura 7 - Briquete obtido do sabugo de milho.



Fonte: Autor (2022)

3.4 Pirólise em reator de leito fixo

Para a degradação térmica da biomassa foi utilizado um reator de leito fixo tubular de quartzo (Figura 8) com comprimento e diâmetro de 100 e 10 cm, respectivamente. A biomassa foi posta dentro do reator na forma de cilindros, com 20 cm de comprimento e diâmetro de 20 mm, sendo que o reator foi aquecido por um forno bipartido reclinável. O reator funcionou em regime de batelada, com uso de vapor de água como o gás de arraste, com vazão de 8 ml por minuto, aquecido em autoclave (Figura 9) a 130 °C.

O ensaio foi feito com uso de duas temperaturas, 550 e 650 °C, com taxa de aquecimento de 30 °C por minuto, e tempo de duração de 30 minutos. Após o ensaio, o material foi reservado para fins de balanço de massa, e o carvão ativado para caracterização química.

Figura 8 - Reator de leito fixo tubular de quartzo.



Fonte: Autor (2022)

Figura 9 - Autoclave vertical.



Fonte: Autor (2022)

3.5 Caracterização do Carvão Ativado

Para a caracterização do Carvão Ativado, Figura 10, que foi obtido através da pirólise em reator de leito fixo da biomassa, sabugo de milho, foram empregados os seguintes métodos:

Figura 10 - Fração sólida obtida através do processo de pirólise do sabugo de milho.



Fonte: Autor (2022)

3.5.1 Densidade Volumétrica Aparente do Carvão

A densidade volumétrica aparente do carvão foi obtida por meio da relação massa/volume de carvão empacotado em uma proveta, seguindo o procedimento descrito anteriormente.

3.5.2 Teor de Cinzas, Teor de umidade, Material Volátil e Teor de Carbono Fixo – CF

Os teores de cinzas, umidade, material volátil e carbono fixo foram determinados utilizando os métodos e equações empregados para o sabugo de milho.

3.5.3 Cálculo do Índice de Iodo

O índice de iodo do adsorvente produzido foi determinado de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 12073:1991 para determinação da quantidade em miligrama de iodo por grama de carvão ativado pulverizador, material carbonáceo obtido pela tratamento termoquímico do sabugo de milho (*Zea mays L*). O carvão foi inspecionado para

verificar se o material atende às condições específicas da NBR 11834:1991, no qual estabelece limites para as características de aceitação e rejeição.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização da Biomassa

A seguir, será apresentada a caracterização da biomassa, resultante das análises experimentais. Resultados estes, que foram obtidos através de métodos gravimétricos clássicos, ou seja, Análise Imediata, Densidade e Cinética de Secagem.

4.1.1 Análise Imediata

Para se determinar os teores de umidade, cinzas, material volátil e carbono fixo da biomassa, foram realizados ensaios em triplicata, de forma a se obter uma média mais precisa do valor real em percentual de cada componente. Os resultados encontrados através das análises no Laboratório LARSEN estão dispostos na Tabela 2, juntamente ainda, com teores relativos de outras biomassas citadas na literatura.

Tabela 2 - Análise imediata de biomassas diversas: (a) SM: Sabugo do Milho, (b) PD: Poda de Árvore, (c) BC: Bagaço de Cana e (d) FC: Fibra de Coco.

Biomassa	Umidade (%)	Materiais Voláteis (%) (*)	Cinzas (%) (*)	Carbono Fixo (%) (**)	Autores
SM	12,17	73,08	2,08	12,66	[1]
SM	9,14	88,12	1,98	9,90	[2]
SM	-	84,68	1,65	13,67	[3]
SM	9,62	87,47	2,51	10,02	[4]
SM	7,00	88,87	2,00	9,13	[5]
PD	8,63	70,95	20,23	8,80	[6]
BC	44,35	79,29	4,55	16,14	[7]
FC	8,87	84,11	1,99	13,9	[8]

* Análise em base seca

** Valores obtidos por diferença

[1]:Presente trabalho; [2]: Machado (2019); [3]: Dantas (2013); [4]: Alves *et al.*, (2016); [5]: Pereira e Seye (2014); [6]: Petricoski (2017); [7]: Arantes (2014); [8]: Agrizzi (2017).

Fonte: Autor (2022).

O teor de umidade representa a quantidade de água perdida pela biomassa, quando submetida a temperaturas próximas a 100 °C (temperatura de ebulição da água). Sendo que,

para ser obtido esse valor, a biomassa deve passar pelo processo de secagem já descrito anteriormente na metodologia da pesquisa, dessa forma, o teor de umidade da biomassa *in natura* triturada foi de 12,17%. Vale frisar que, esse parâmetro é fundamental para a caracterização da biomassa, pois está diretamente ligado ao seu poder de queima, onde quanto maior a umidade, maior será seu poder calorífico. Conforme Pedroza *et al.*, (2014), o teor de umidade e o tamanho das partículas são as principais variáveis associadas às características da biomassa, e têm grande influência na dinâmica do processo de pirólise, sendo que, quanto mais seca estiver a biomassa, menos degradante será o processo de pirólise. De acordo com os pesquisadores ainda, o teor de água tem um grande impacto no consumo de energia durante o processo de secagem da biomassa, de uma forma que, a proporção final de água obtida no fim da pirólise, normalmente é superior ao seu teor de umidade, indicando assim, que existe geração de líquido durante o processo.

Em relação ao teor de cinzas, podemos declarar que ele, é o percentual de compostos inorgânicos presentes na biomassa, ou seja, a presença de cálcio, ferro, sódio, potássio, magnésio, fósforo, entre outros componentes na biomassa. Na sua determinação, a biomassa passa por um processo de combustão em temperaturas na faixa de 710 °C, de forma que, os componentes orgânicos reagem com o oxigênio, restando assim apenas os componentes inorgânicos. Nesta pesquisa, o teor de cinzas obtido foi na ordem de 2,08%, vendo isso, Fonts *et al.* (2009) afirma que, o teor de cinzas possui grande influência na pirólise da biomassa, pois favorece um acréscimo no rendimento da porção gasosa e decréscimo na quantidade da porção líquida.

O teor de materiais voláteis, fazem referência à perda, em massa, de elementos que se volatilizam em temperaturas próximas a 850°C, tornando assim, diferente do teor de cinzas, pois a massa do material volátil é determinada em atmosfera inerte, ou seja, na ausência de oxigênio, de forma que se mantenham os compostos orgânicos. Neste trabalho, o teor de massa volátil encontrado foi de 73,08%, temos que, quanto maior os valores obtidos de teor de material volátil, maior será o poder de reação da biomassa, pois ele é diretamente ligado ao poder de ignição do material. Machado (2019) ainda afirma que, o material volátil da biomassa interfere diretamente na sua facilidade de queima, onde quanto maior o teor de materiais voláteis, maior será a reatividade e consequentemente a sua combustão.

Por último, temos o valor de carbono fixo, que seria o percentual de compostos remanescentes após o processo de liberação dos materiais voláteis, retirando-se umidade e cinzas. O valor obtido no teor de carbono fixo da biomassa do sabugo do milho *in natura* foi de 12,66 %, valor próximo ao encontrado por Dantas (2013). Para Machado (2019), o teor de carbono fixo e o teor de lignina possuem uma relação, sendo que, quanto maior o teor de lignina, maior será o teor de carbono fixo, devido ao fato de que a lignina é o componente fundamental para a madeira resistir a decomposição térmica, quando comparado à celulose e hemicelulose, pois é uma estrutura mais complexa.

4.1.2 Densidade Aparente

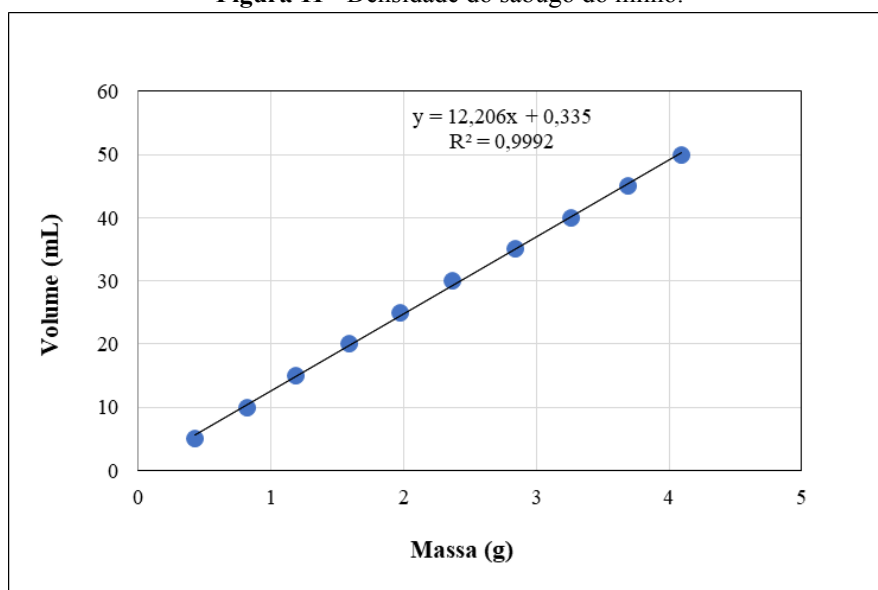
Na determinação da densidade volumétrica aparente da biomassa do sabugo de milho *in natura*, utilizou-se a média aritmética dos valores apresentados na Tabela 3, e o valor médio encontrado foi de 0,081 g/mL, esse parâmetro é considerado importante devido a sua influência na compactação da biomassa na percolação de fluidos.

Tabela 3 - Densidade volumétrica aparente do sabugo de milho

Ensaio	Densidade (g/mL)
1	0,085
2	0,082
3	0,079
4	0,080
5	0,080
6	0,081
7	0,082
8	0,082
9	0,082
10	0,082
Média	0,081

Fonte: Autor (2022).

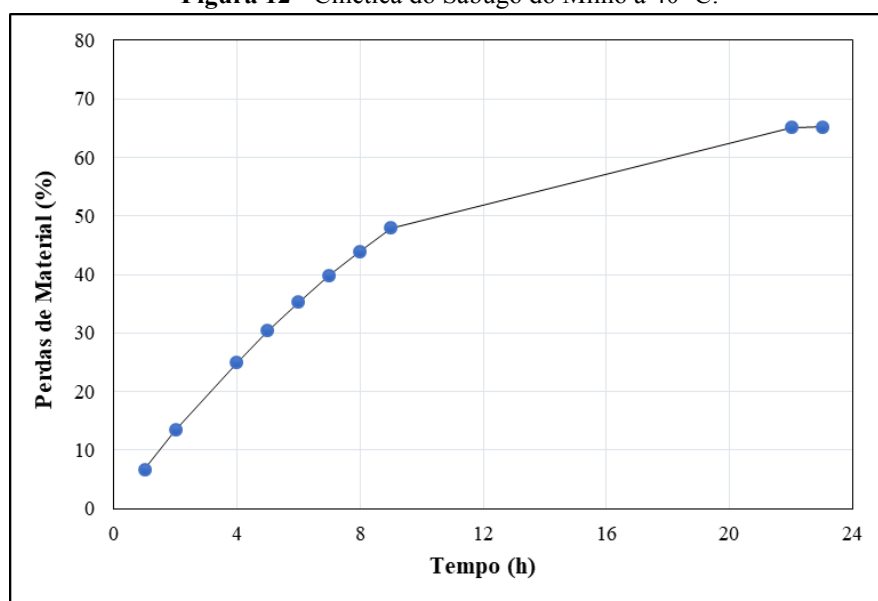
Assim temos, na Figura 11, o gráfico de dispersão da massa (x) em função do volume (y) da biomassa.

Figura 11 - Densidade do sabugo do milho.

Fonte: Autor (2022)

4.1.3 Estudo Cinético de secagem do sabugo de milho *in natura*

A Figura 12 apresenta a curva de secagem da biomassa *in natura* em função do tempo, na temperatura de 40°C. Sánchez *et al.* (2009) ressalta que, a etapa onde se tem o maior gasto de energia em processos térmicos é a etapa de secagem inicial da biomassa, pois é um processo que depende do teor de umidade da amostra.

Figura 12 - Cinética do Sabugo do Milho à 40 °C.

Fonte: Autor (2022)

Foi possível observar também que, ao final do ensaio, o peso da amostra submetida à secagem em 40°C permaneceu constante, mostrando assim, que ocorreu secagem completa do material. Sendo assim, para o período de secagem de 23 horas, o percentual de perda de massa para a temperatura de 40 °C foi de 65%.

4.2 Rendimentos do carvão ativado obtido durante a pirólise do sabugo de milho

Os rendimentos das frações sólidas provenientes da pirólise, carvão ativado, não tiveram grande disparidade, sendo que, para temperatura de 550°C com taxa de aquecimento de 30 °C/min e tempo de pirólise de 30 minutos, ele foi de 26,96%. Enquanto para a temperatura de 650°C, com a mesma taxa de aquecimento e tempo de pirólise, o rendimento foi de 22,69%.

Para Machado (2019), a temperatura final do processo de pirólise exerce um papel de grande importância em relação às reações químicas, além de conseguir influenciar as características tanto físicas quanto químicas dos produtos criados. O autor ainda afirma que o aumento da temperatura e do tempo de reação, faz com que se diminua a quantidade de materiais voláteis e líquidos gerados, afetando até mesmo a de carvão. Mas ele cita também que, esse longo aquecimento a altas temperaturas favorece uma maior organização estrutural do carvão, de forma a aumentar o volume dos poros.

Vale mencionar também que, é possível calcular o valor que se obtém em carvão ativado por tonelada de biomassa gerada. Sendo assim, temos que a cada tonelada de biomassa, gera-se em torno de 270 kg de carvão ativado, na temperatura de 550°C. E, de acordo com dados liberados pela Estação de Tratamento de Palmas-TO, o valor do carvão é de R\$3,89/kg, ou seja, para cada tonelada de biomassa, se obtém um valor de R\$1.050,30 em carvão ativado.

4.3 Caracterização do Carvão Ativado

Será apresentada a seguir, a caracterização do carvão ativado resultante da degradação termoquímica do sabugo de milho. Os resultados da caracterização foram obtidos através das análises experimentais, por meio de métodos gravimétricos clássicos (Análise Imediata, Densidade e Cinética de Secagem).

4.3.1 Análise Imediata do Carvão Ativado

Na determinação dos teores de umidade, cinzas, material volátil e carbono fixo do carvão ativado, foram realizados ensaios por meio de duplicata, com o intuito de encontrar a média do percentual de cada procedimento. O carvão ativado analisado é proveniente de duas condições: a) i - 550 °C, ii - 30 °C/min e iii - 30 minutos; b) i - 650 °C, ii - 30 °C/min e iii - 30 minutos. Os valores obtidos pelas análises no Laboratório LARSEN estão dispostos na Tabela 4, juntamente com alguns teores relativos de análises imediatas de amostras de outros tipos de carvões ativados. Onde: (i): temperatura; (ii): taxa de aquecimento e (iii): tempo de reação.

Tabela 4 - Análise imediata do carvão. SM: Sabugo do Milho; BC: Bagaço de Cana; FC: Fibra de Coco.

Carvão Ativado	Umidade (%)	Materiais Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono Fixo (%)	Autores
SM (a)	3,97	23,02	8,20	64,80	[1]
SM (b)	2,98	26,39	10,65	59,98	[1]
SM	3,43	38,68	17,09	40,80	[2]
SM	5,40	30,74	6,97	62,29	[3]
SM	-	39,83	4,00	56,17	[4]
BC	3,72	73,18	3,80	19,30	[5]
FC	4,85	29,90	13,03	58,07	[6]

[1]: Presente trabalho; [2]: Machado (2019); [3]: Vieira (2012); [4]: Padilla (2018); [5]: Gonçalves et al., (2014); [6]: Cortez et al., (2009).

Fonte: Autor (2022).

Ao se comparar os parâmetros de material volátil para a biomassa de sabugo de milho e o carvão ativado, é possível observar que para o carvão, o valor sofre uma grande redução, acarretando assim, de acordo com Vieira (2012), ao fato de que este queimará de maneira mais lenta durante o processo de produção de energia. Neste estudo, o teor de materiais voláteis encontrados na análise imediata do carvão foi de aproximadamente 23,02% e 26,39%, valores próximos ao encontrado por Cortez *et al.* (2009) de 29,9%.

Vale dizer que, a umidade do carvão é um fator de grande importância, e isso ocorre mais ainda caso leve-se em consideração quando se tem o intuito de empregar o material no processo de geração de energia através de sua combustão. Com isso também, fica notável a diminuição da umidade do carvão, comparada com o sabugo de milho, onde para o carvão, os valores são de 3,97% e 2,98%.

Por fim, temos também os parâmetros de teor de cinzas e o de carbono fixo, que ao contrário dos outros dois, tiveram um aumento em relação a biomassa. Os valores obtidos

para teor de cinzas foram, 8,20% e 10,65%. Já os valores de carbono fixo foram, 64,80% e 59,98%, o que obteve o aumento mais significativo.

4.3.2 Densidade Aparente do carvão

A densidade volumétrica aparente do carvão proveniente do sabugo de milho, foi obtida através da média dos valores encontrados nos ensaios no Laboratório LARSEN, e esse valor foi de 0,071 g/mL, conforme apresentado na Tabela 5 a seguir.

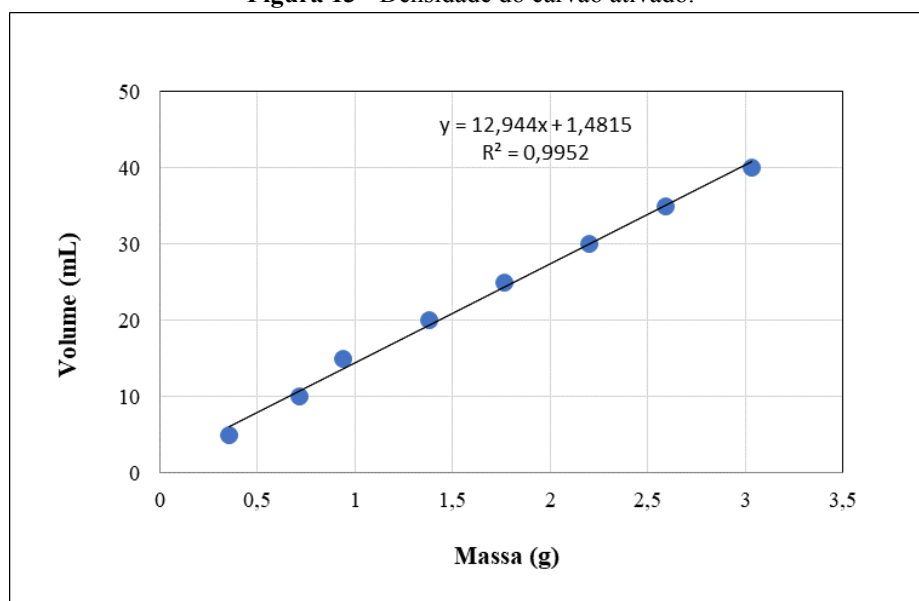
Tabela 5 - Densidade aparente do carvão do sabugo do milho

Ensaio	Densidade (g/mL)
1	0,071
2	0,072
3	0,063
4	0,069
5	0,071
6	0,073
7	0,074
8	0,076
Média	0,071

Fonte: Autor (2022).

Dessa forma temos, na Figura 13, o gráfico de dispersão da massa (x) em função do volume (y) da biomassa.

Figura 13 - Densidade do carvão ativado.



Fonte: Autor (2022)

4.3.3 Índice de Iodo

Os ensaios para a obtenção do índice de iodo, tiveram como base os procedimentos estabelecidos pela NBR 12073:1991, onde foi possível determinar a quantidade em miligrama de iodo por grama de carvão ativado pulverizador, material esse, que foi obtido através do tratamento termoquímico do sabugo de milho (*Zea mays L*) *in natura*. O carvão obtido foi analisado para verificar se o material atendia às condições estabelecidas pela NBR 11834:1991, na qual, os limites de aceitação e rejeição dessas características são estabelecidos.

Os carvões analisados foram obtidos em duas temperaturas, 550 e 650°C, conforme os procedimentos já descritos no presente trabalho. O produto da temperatura de 550°C, teve capacidade de adsorção de iodo de 222,13 mgI₂/g. Por sua vez, para a temperatura de 650°C o resultado foi de 347,79 mgI₂/g, ou seja, o número de iodo foi 56% superior ao de 550°C. De acordo com a NBR 11834:1991, o limite mínimo para o número de iodo é de 600 mgI₂/g, referente a quando o carvão ativado terá o intuito de ser utilizado na adsorção de impurezas, dessa forma, o carvão ativado advindo da biomassa do sabugo de milho (*Zea mays L*) feito de acordo com a metodologia deste estudo, não conseguiu chegar no limite mínimo aceito a esta característica determinada pela norma de carvão ativado pulverizado.

O estudo demonstrou que, em média, o índice de iodo obtido foi 52,5% menor que o limite mínimo estabelecido como critério para aceitação do carvão ativado para tratamento de água no abastecimento público. Vale mostrar também, outros estudos relacionados a adsorção do carvão ativado, Tabela 6, estudos estes que demonstram o número de iodo provenientes de diferentes biomassas.

Tabela 6 - Resultado do índice de iodo do carvão ativado (*Zea mays L*). SM: Sabugo do Milho; CC: Casca de Coco; P:Reflorestamento de Pinus; CCB: Casca de Coco de Babaçu; PAJ: Poda de Árvores de Jamelão.

Carvão Ativado	Temperatura da Pirólise (°C)	Número de Iodo (mgI ₂ /g)	Autores
SM	550	222,13	[1]
SM	650	347,79	[1]
CC	850	402,50	[2]
P	800-1000	672,1	[3]
P + CCB	800-1000	831,1	[3]
PAJ	500	1162,07	[4]
PAJ	650	1189,43	[4]

[1]: Presente trabalho; [2]: Román et al.(2006); [3]: Fischer et al. (2019); [4]: Lôbo (2021).

Fonte: Autor (2022).

Com isso, foi possível observar algumas características, sendo uma a de que, quanto maior a densidade da biomassa, maior será seu índice de iodo. Román et al. (2006) ainda afirma que, o aumento da temperatura produz um aumento na porosidade do carbono e consequentemente, aumento da qualidade do carvão ativado.

5 CONCLUSÕES

Diante de tudo que foi exposto, é importante frisar o que foi identificado neste estudo, levando em consideração as análises que foram feitas, que foram, a caracterização da biomassa da *Zea mays L*, o estudo cinético de secagem do sabugo de milho *in natura* e caracterização do carvão ativado.

A Biomassa que foi estudada é constituída de altos teores de materiais voláteis (73,08%) e carbono fixo (12,66%), essas características em abundância indicam que existe a possibilidade do uso desse material na fabricação de itens carbonáceos.

No decorrer da cinética de secagem da biomassa, foi possível observar que, nas primeiras 9 horas o processo de secagem acontece com um crescimento linear de perda de massa. Nesse período de nove horas de experimento, a biomassa perdeu 41,23% de sua

massa inicial, em uma temperatura de 40°C. Por fim, após o período de 23 horas de secagem, foi observado que o resíduo permaneceu com menos de 35% do seu material inicial.

Temos também que, durante os ensaios de pirólise da biomassa, o maior rendimento obtido foi de 26,96%, rendimento este que foi obtido na temperatura de 550°C, com taxa de aquecimento de 30 °C/min e tempo de duração do ensaio de 30 minutos.

Não se pode esquecer também que, é factível o cálculo do valor que se obteria em carvão ativado, por tonelada de milho produzido. Em consequência disso, calculamos que a cada tonelada de milho (*Zea mays L*), gera-se 180 kg de biomassa, que por sua vez, na temperatura de 550°C, produz cerca 48,5 kg de carvão ativado. E, de acordo com dados da Estação de Tratamento de Palmas-TO, o custo do carvão ativado é de R\$3,89/kg, ou seja, para cada tonelada de milho produzido, gera-se em torno de R\$190,00 em carvão ativado, derivado do processo de pirólise.

Já em relação ao carvão proveniente do processo de degradação termoquímico, ele também foi analisado, tendo assim como características, o baixo teor de cinzas e índice de iodo próximo a 350 mgI₂/g.

Por conseguinte, vale dizer que é muito importante a exploração desses resíduos, uma vez que, o Brasil tem um déficit em matéria prima para produção do carvão ativado, e sua utilização faria com que, esses resíduos que estão sendo descartados no ambiente tenham uma destinação adequada, além de ser concebível agregar valor.

REFERÊNCIAS

- AGRIZZI, T. (2017). **Pirólise da casca de coco: Estudo da cinética de de volatilização e identificação dos produtos**. 101p. Dissertação de Mestrado, Centro Universitário Norte do Espírito Santo, Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2017.
- ALBUQUERQUE JÚNIOR, E. C. et al. Efeito da estrutura porosa de carvões ativados sob a cinética de adsorção de microcistinas em processo batelada. In: Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 13, 2008b, Belém do Pará. **Anais**. Belém do Pará: ABES, 2008a.
- ALBUQUERQUE JÚNIOR, E. C. et al. Remoção de contaminantes orgânicos tóxicos presentes em água por meio de adsorção em carvão ativado. In: Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 13, 2008a, Belém do Pará. **Anais**. Belém do Pará: ABES, 2008b.
- ALVES, D. A. H.; Barcellos, K. M.; Abud, A. K. S. (2016). Caracterização de briquetes obtidos a partir de resíduos do beneficiamento da mandioca e do milho. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.18, n.1, p.41-48, 2016.
- ARANTES, D.C. (2014). **Bagaço de cana de açúcar: análise térmica e energética de biomassa**. 99p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11.834**: Carvão ativado pulverizado. Rio de Janeiro: ABNT, 1991b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12.073**: Carvão ativado pulverizado: Determinação do número de iodo. Rio de Janeiro: ABNT, 1991a.
- ASTM D 3173-85. **Standard Test of Humity**, (1985).
- ATES, F., M. A. ISIKDAG, M. A. “Influence of temperature and alumina catalyst on pyrolysis of corncob,” **Fuel**, 88(10), 1991–1997 (2009).
- AVELAR, K. P. B. de. **Estudo da influência da temperatura na degradação termoquímica da biomassa de avelós (*euphorbia tirucalli* Linn)**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química,, UFRN, Natal, 2003.
- BARTOCCI, P. *et al.* 2018. Batch pyrolysis of pellet made of biomass and crude glycerol: mass and energy balances. **Renewable Energy**, Copenhaguen, v. 124, p. 172-179. 2018.
- BINIÁK, S.; SWIATKOWSKI, A.; PAKULA, M. Eletrochemical studies of phenomena at active carbon- electrolyte solutions interfaces. In: Ljubisa R. Radovic eds. *Chemistry and Physics of Carbon*. New York: Marcel Dekker, 2001. vol. 27; cap.3, p. 126-216.

BRIDGWATER, C. *et al.* **Fast Pyrolysis of Biomass: a handbook**. Reino Unido: Aston University, Bio-Energy Research Group, 2008. 188 p.

BRIDGWATER, A. V. 2003. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. **Chemical Engineering Journal**, Germany, v. 91, p. 87-102, 2003.

CAO, Q. *et al.*, “Pyrolytic behavior of waste corn cob,” **Bioresour. Technol.** 94(1), 83–89 (2004).

CASTRO, A. M.; PEREIRA JR., N. Produção, propriedades e aplicação de celulases na hidrólise de resíduos agroindustriais. **Química Nova**, v.33, nº 1, p.181-188, 2010.

CERANIC, M. *et al.*, (2016) Experimental investigation of corn cob pyrolysis, **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 8, 6ª Edição, 2016.

CHEN, G.; LIU, C.; MA, W.; ZHANG, X.; LI, Y.; YAN, B.; ZHOU, W. Co-pyrolysis of corncob and waste cooking oil in a fixed bed. **Bioresource Technology**, 166, p. 500–507, 2014.

CHERUBINI, F.; STROMMAN, A. Principles of Biorefining. In: ASHOK *et al.* *Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes*. [S.l.: s.n., 2011]. Cap.1, p. 1-22.

COELHO, J. D. Produção de grãos - Feijão, milho e soja. **Caderno Setorial ETENE**, nº 81, mai, 2019.

CORTEZ, L. A. B. *et al.*, (2009). Processing of coconut shell and fiber for adding value. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**. Campinas, v.3 n.1, p.021-030, 2009.

DANTAS, V. F. S. (2013) **Potencial energético dos resíduos da cultura do milho (*Zea mays L.*) e do epicarpo do pinhão manso (*Jatropha curcas L.*)**. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL – nº/ 2013, Departamento de engenharia florestal, Universidade de Brasília, Brasília DF, 40p.

DUARTE, A. D. **Biomass-to-liquids: uma contribuição ao estudo da obtenção de biocombustíveis sintéticos através da síntese Fischer-Tropsch**. 2009. 143p. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

FONTS, I., AZUARA, M., GEA, G., MURILLO, M. B. Study of the pyrolysis liquids obtained from different sewage sludge. **J. Anal. Appl. Pyrolysis**, 85, p.184–191, 2009.

FISCHER, H. C. V. *et al.* Estudo da capacidade de adsorção de carvões ativados comerciais *versus* tempo de armazenamento. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 3, p. 1090, 2019.

GONÇALVES, G. C.; NAKAMURA, P. K.; VEIT, M. T. (2014). Produção e caracterização de carvão ativado obtido a partir dos resíduos da indústria cervejeira. **10º Encontro Brasileiro sobre Adsorção**. p. 1-8. Guarujá, São Paulo, 2014.

GREENBANK, M.; SPOTTS, S. Effects of starting material on activated carbon characteristics and performance. *Industrial Water Treatment*, p.19-27, jan/fev, 1995.

HIGMAN, C.; van der BURGT, M. *Gasification*. Massachussets: Elsevier , 2003. p.391

KLASS, D. L. **Biomass for Renewable Energy. Fuels, and Chemicals** 1. ed. Califórnia: Academic Press, 1998. 651 p.

LÔBO, Ranyere do Nascimento. **Degradação térmica de podas de árvores (*syzygium cumini*) visando a produção de carvão ativado para uso industrial**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2021.

LOPES, M. M. **Avaliação do hidrolisado hemicelulósico de sabugo de milho suplementado com proteína de farelo de soja solubilizada para obtenção de bioetanol**. 106. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Biotecnologia Industrial na área de concentração Microbiologia Aplicada, Universidade de São Paulo, Lorena, 2015.

LORA, E. E. S. *et al.* Gaseificação e pirólise para a conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis. **Biocombustíveis**. v. 2, Rio de Janeiro: Interciência. 2012.

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

MIRANDA, M. R. S. **Investigação da pirólise de biomassas do cerrado para aplicação à sistemas de gaseificação estagiada**. Brasília. 2017. Tese (Doutorado em Ciências Mecânicas) – Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

MULLEN, C. A. et al., (2010) Bio-oil and bio-char production from corn cobs and stover by fast pyrolysis, **Biomass & Bioenergy**. 34, p. 67-79, 2010.

PADILLA, E. R. D. (2018) **Aproveitamento de resíduos agroindustriais: caracterização físico – química e produção de carvão para energia**. 70 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, Campus Sorocaba, 2018.

PEDROZA, M. M., SOUSA, J. F., VIEIRA, G. E. G., BEZERRA, M. B. D., Characterization of the products from the pyrolysis of sewage sludge in 1 kg/h rotating cylinder reactor. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 105, p. 108-115, 2014.

PEREIRA, T. V.; SEYE, O. (2014) Caracterização física térmica de biomassa local. 5º ENCONTRO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO, 2014. **8º ENEPE UFDG, 5º EPEX UEMS**. Dourados, Mato Grosso do Sul, 2014. p. 1 - 9.

PETRICOSKI, S. M. (2017). **Briquetes produzidos com mistura de podas urbanas, glicerina e resíduos de processamento de mandioca**. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Cascavel, 2017.

RAMOS, R. R. F. **Desenvolvimento de compósitos de polipropileno (PP) com sabugo de milho (SM) provenientes de resíduos agrícolas**. 76. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013.

ROMÁN, S. et al. Preparation and characterization of carbons for the retention of halogens in the condenser vacuum system of a thermonuclear plant. **Applied Surface Science**, v. 252, n. 17, p. 6036–6041, 30 jun. 2006.

SULTANA, B.; ANWAR, F.; PRZYBYLSKI, R. Antioxidant potential of corncob extracts for stabilization of corn oil subjected to microwave heating. **Food Chemistry**, v. 104, n. 3, p. 997–1005, 2007.

TANG, S.; CHEN, Y.; XIE, R.; Jiang, W. Preparation of activated carbon from corn cob and its adsorption behavior on Cr(VI) removal. **Water Sci Technol**, 73, p.2654-2661, 2016.

VIEIRA, Ana C., (2012) **Caracterização da Biomassa Proveniente de Resíduos Agrícolas para Geração de Energia**. Dissertação de Mestrado em Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Cascavel, 2012.

WORASUWANNARAK, N. SONOBE, T. TANTHAPANICHAKOON, W. “Pyrolysis behaviors of rice straw, rice husk, and corncob by TG-MS technique,” **J. Anal. Appl. Pyrolysis** 78(2), 265–271 (2007).

YANG, H. *et al.* Mechanism of palm oil waste pyrolysis in a packed bed. **Energy Fuels**, Washington, D. C., v.20, p. 1321-1328, 2006.

ZHANG, H. *et al.* “Comparison of non-catalytic and catalytic fast pyrolysis of corncob in a fluidized bed reactor,” **Bioresour. Technol.** 100(3), 1428–1434 (2009).

ZIGLIO, B. R. Elaboração de pães com adição de farinha de sabugo de milho. **Revista de Ciências Exatas e Naturais**. Vol.9, nº 1, Jan./Jun. 2007.