



UNISUL

UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

SUSANA CLAUDETE COSTA

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO AGRÍCOLA E GLICEROL COMO
BIOCOMBUSTÍVEL SÓLIDO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA**

Palhoça

2015

SUSANA CLAUDETE COSTA

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO AGRÍCOLA E GLICEROL COMO
BIOCOMBUSTÍVEL SÓLIDO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Ambiental e Sanitária da Universidade do
Sul de Santa Catarina como requisito
parcial à obtenção do título de Engenheira
Ambiental e Sanitarista.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Rachel Faverzani Magnago

Palhoça

2015

SUSANA CLAUDETE COSTA

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO AGRÍCOLA E GLICEROL
COMO BIOCOMBUSTÍVEL SÓLIDO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Engenheira Ambiental e Sanitarista e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Palhoça, 26 de junho de 2015.



Professora e orientadora Rachel Faverzani Magnago, Dr^a.
Universidade do Sul de Santa Catarina



Professora Heloisa Regina Turatti Silva, Dr^a.
Universidade do Sul de Santa Catarina



Professora Marina de Medeiros Machado, Ms.
Universidade do Sul de Santa Catarina



Mark J. Rae
Engenheiro Sanitarista e Ambiental

Com muito carinho, dedico este trabalho a minha querida mãe, Claudete e ao meu pai, Pedro. Ao meu namorado e amigo, Rodrigo Paulo Raimundo, que me incentivou, deu coragem e não mediu esforços para a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas conquistas recebidas.

A minha orientadora, professora Rachel Faverzani Magnago, pelo esforço, amizade, auxílio, atenção e dedicação.

Agradeço aos meus colegas do laboratório de Química e de Engenharia Ambiental pelo auxílio nos trabalhos e, principalmente, por estarem comigo nesta jornada, tornando-a mais fácil.

Aos meus amigos pelo apoio nos momentos difíceis, em especial minha amiga Patrícia Medeiros.

Agradeço aos meus colegas de trabalho pela compreensão e apoio, em especial ao Cel. Emerson Neri Emerin, que não mediu esforços em me ajudar.

Agradeço a Leonardo Thums e equipe da Empresa ACT sistemas, que disponibilizaram o aplicativo SMOKESHOT para as análises necessárias.

Agradeço carinhosamente a minha família: aos meus pais e irmãos pelo incentivo e colaboração, por me entenderem e ajudarem quando mais preciso.

Ao meu namorado pela dedicação, sempre disposto a me ajudar e encorajando-me a enfrentar os momentos difíceis. Muito obrigada!

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original” (Albert Einstein).

RESUMO

A casca de arroz está entre as fontes renováveis abundantes e de valor reduzido, acessível para a conversão em produtos com valor agregado. O objetivo deste trabalho foi avaliar as propriedades de corpos de prova produzidos com casca de arroz aglutinados com amido, glicerol e ácido acético. Para confeccioná-los foi utilizada casca de arroz com granulometria menor do que o tamanho da biomassa, aproximadamente 2 mm. Inicialmente, a casca foi moída e peneirada, misturada e homogeneizada na chapa de aquecimento com todos os componentes. As misturas realizadas foram moldadas e levadas à estufa para secagem, e todos os corpos de prova foram usados para análise de teor de umidade, teor de cinzas, poder calorífico superior e inferior, resistência mecânica à compressão, monitoramento de fumaça e análise de infravermelho. Os combustíveis sólidos produzidos que tiveram maior poder calorífico foram aqueles com os dois aglutinantes juntos (amido e glicerol), chegando ao PCS 13,47 MJ/kg e PCI 12,07 MJ/kg. Foi encontrado nos teores de cinzas o valor de 11,71% nas amostras contendo amido e glicerol. Na resistência mecânica dos corpos de prova com casca de arroz, amido, glicerol e ácido acético foi encontrado um valor de 1,23. A composição dos combustíveis sólidos foi caracterizada por infravermelho. Os resultados para a densidade de fumaça ficaram no nível 2 da escala de Ringelmann. Os combustíveis sólidos atenderam as funções esperadas deste estudo, podendo desempenhar satisfatoriamente a substituição das fontes caloríficas tradicionais, comparando-se inclusive aos tradicionais briquetes de carvão e lenha.

Palavras-chave: Combustível Sólido. Casca de arroz. Glicerol.

ABSTRACT

Rice husk is among the abundant renewable sources, which has reduced value, and is available for conversion into value-added products. The objective of this study is to evaluate the properties of specimens produced with rice husk bonded with starch, glycerol and acetic acid. In order to make these specimens, the rice husk used had its particle size smaller than the size of the biomass, approximately 2mm. Initially, the rice husk was ground and sieved, mixed and homogenized in the hot plate with all components. The mixtures made were molded and taken to the kiln for drying, and all the specimens were used for humidity content analysis, ash content, upper and lower calorific value, mechanic compressive strength, smoke monitoring and infrared analysis. According to the results, the solid fuels produced that had higher calorific value were those with the two binders together (starch and glycerol), reaching 13,47 MJ/kg and 12,07 MJ/kg. The value of 1.23 MPa was found for mechanic strength of the test samples with rice husk, starch, glycerol and acetic acid, due to the chemical bonds. The composition of solid fuels was characterized by infrared. The results for smoke density were registered in level 2 of the Ringelmann scale. The solid fuels reached the expected functions of this study, being able to satisfactorily replace traditional heat sources. It is even possible to compare their performance to traditional charcoal briquettes and firewood.

Key words: Solid fuel. Rice husk. Glycerol.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fontes de biomassa	22
Figura 2 - Fluxograma de desenvolvimentos dos combustíveis sólidos.	31
Figura 3 – (a) Gel obtido a partir da mistura de 10 g amido em 100 ml de água; (b) adição de casca de arroz na mistura amido em água	34
Figura 4 – (a) Molde utilizado para fabricação do material; (b) Molde utilizado para fabricação do material inicial.....	35
Figura 5 – Secagem dos corpos de prova em estufa	35
Figura 6 – Combustíveis sólidos confeccionados	39
Figura 7 – (a) Prensa Hidráulica utilizada para compactação; (b) molde obtido a partir da compactação.....	41
Figura 8 – Foto da fumaça dos corpos de prova durante a queima; (a) casca de arroz e amido; (b) casca de arroz, amido e ácido acético; (c) casca de arroz, amido com glicerol; (d) casca de arroz, amido, glicerol e ácido acético	51
Figura 9 – Reação química de esterificação entre a celulose e a hemicelulose, catalisada por ácido.....	54
Figura 10 – Reação química de esterificação entre a celulose e a hemicelulose e glicerol catalisada por ácido.....	56
Figura 11 – Espectros de IV de casca de arroz e das quatro composições do combustível sólido	58

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Oferta interna de energia elétrica na fonte	25
Gráfico 2 - Média do Teor de Umidade	43
Gráfico 3 - Média do Teor de Cinzas	45
Gráfico 4 - Média do Poder Calorífico Superior em MJ/kg	48
Gráfico 5 - Média do Poder Calorífico Inferior em MJ/kg	50
Gráfico 6 - Escala de Ringelmann da fumaça dos corpos de prova; (a) casca de arroz e amido; (b) casca de arroz, amido e ácido acético; (c) casca de arroz, amido e glicerol; (d) casca de arroz, amido, glicerol e ácido acético	51
Gráfico 7 - Nível de densidade da Escala de Ringelmann da fumaça dos corpos de prova; (a) casca de arroz e amido; (b) casca de arroz, amido e ácido acético; (c) casca de arroz, amido e glicerol; (d) casca de arroz, amido, glicerol e ácido acético	52
Gráfico 8 - Tensão mecânica de compressão e deformação suportada por corpo de prova de casca de arroz, amido, glicerol e ácido acético; casca de arroz e glicerol; casca de arroz, amido, amido, ácido acético; e casca de arroz e amido	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição dos combustíveis sólidos	33
Tabela 2 - Teor de Umidade, média e desvio padrão	42
Tabela 3 - Teor de Cinzas, média e desvio padrão	44
Tabela 4 - Poder Calorífico Superior em MJ/kg, média e desvio padrão	47
Tabela 5 - Poder Calorífico Inferior em MJ/Kg, média e desvio padrão.....	49

LISTA DE SIGLAS

CENBIO - Centro Nacional de Referência em Biomassa

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FAO - Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação

MME - Ministério de Minas e Energia

PCI - Poder Calorífico Inferior

PCS - Poder Calorífico Superior

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVA	17
1.2	OBJETIVOS	19
1.2.1	Objetivo geral	19
1.2.2	Objetivos específicos	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	ENERGIA TÉRMICA	20
2.2	REAÇÃO DE COMBUSTÃO COMPLETA E INCOMPLETA	20
2.3	BIOMASSA	21
2.3.1	Biomassa no Brasil	23
2.3.1.1	Glicerol	24
2.3.2	Estrutura da biomassa	26
2.3.3	Propriedades físicas da biomassa	27
2.3.3.1	Massa específica	27
2.3.3.2	Densidade	27
2.3.3.3	Teor de umidade	28
2.3.3.4	Teor de cinzas	28
2.3.3.5	Poder calorífico	29
2.3.3.6	Escala de Ringelmann	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1	MATÉRIA-PRIMA	32
3.2	PREPARAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS	33
3.3	TEOR DE UMIDADE	36
3.4	TEOR DE CINZAS	36
3.5	VOLUME DOS COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS	36
3.6	DENSIDADE APARENTE	37
3.7	PODER CALORÍFICO SUPERIOR E INFERIOR	37
3.8	RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO	37
3.9	MONITORAMENTO DE FUMAÇA	38
3.10	ANÁLISE DE INFRAVERMELHO	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1	PREPARAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS	39

4.2	TEOR DE UMIDADE	42
4.3	TEOR DE CINZAS	44
4.4	PODER CALORÍFICO SUPERIOR.....	46
4.5	PODER CALORÍFICO INFERIOR.....	48
4.6	ESCALA DE RINGELMANN	50
4.7	ENSAIO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	53
4.8	ANÁLISE DE INFRAVERMELHO	58
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	60
	REFERÊNCIAS	62
	ANEXOS	68
	ANEXO A – GRANULOMETRIA.....	69
	ANEXO B – EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	70
	ANEXO C – METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA, DENSIDADE, VOLUME, TEOR DE UMIDADE	71
	ANEXO D – CORPOS DE PROVA APÓS SECAGEM EM ESTUFA.....	72
	ANEXO E – EQUIPAMENTO UTILIZADO COMO MEDIDOR DE TEOR DE CINZAS	74
	ANEXO F – CHAPA DE AQUECIMENTO	75
	ANEXO G – CHAPA DE AQUECIMENTO FLUXOGRAMA REPRESENTANDO A METODOLOGIA UTILIZADA NO TRABALHO	76

1 INTRODUÇÃO

O reaproveitamento de materiais é um tema amplamente discutido no meio acadêmico e pela sociedade, uma vez que envolve aspectos técnicos, econômicos e ambientais, sendo essa prática classificada como reciclagem (SILVA; SOUZA; SILVA, 1996). Além disso, a energia produzida a partir de materiais que seriam descartados de forma indevida é um dos fatores chave no desenvolvimento econômico e social, visto que o consumo mundial de energia aumentará em pelo menos, um terço entre 2010 e 2035, segundo estimativa da Agência Internacional de Energia (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2011, *apud* Embrapa, 2012), bem como a redução de impactos negativos no descarte de resíduos quando de forma não apropriada.

Deve-se dar maior importância à utilização de fibras naturais de origem vegetal, uma vez que há uma variedade de espécies passíveis de serem pesquisadas, além de serem produzidas em praticamente todos os países. As fibras podem ocorrer espontaneamente na natureza, outras cultivadas como atividade agrícola, e ainda há aquelas que são resíduos gerados pela agroindústria.

Também se pode afirmar que resíduos da agroindústria trazem vantagens como fonte renovável de energia, e estão associados com a mitigação das emissões de dióxido de carbono (CO₂). Neste sentido, é dado que todo CO₂ emitido na utilização energética da biomassa tenha sido antecipadamente fixado no crescimento da matéria vegetal. Contudo, as principais desvantagens estão em sua baixa massa específica, que contribui nos custos relacionados ao transporte para o seu aproveitamento energético (ZURICH, 2008 *apud* VIEIRA, 2014).

Entre as possíveis formas de reutilização dos resíduos agrícolas e florestais para a produção energética, tem-se o processo da briquetagem. A briquetagem é constituída de biomassa com resíduos de materiais agrícolas ou industriais e uma das alternativas consideradas para geração de energia que oferece melhor aproveitamento em forma de briquetes. Constitui-se na compactação de uma massa de matéria-prima, transformando-a em sólido compacto com massa específica aumentada em relação à biomassa *in natura* e com alto poder calorífico (FILIPPETTO, 2008).

Segundo o Centro Nacional de Referência (CENBIO, 2009, *apud* VIEIRA, 2014), em muitas capitais e em grandes centros urbanos, o briquete vem apresentando destaque, competindo diretamente com a lenha e o carvão vegetal.

Ainda, segundo CENBIO (2015), o uso de briquetes está associado à preservação ambiental, pois aproveita resíduos e substitui a lenha e o carvão vegetal. Nos grandes centros, capitais e grandes cidades, o briquete é bastante utilizado como, por exemplo, na cidade de São Paulo, onde existem 5.000 pizzarias e 8.000 padarias, das quais aproximadamente 70% utilizam fornos à lenha. Atualmente, os fabricantes de briquetes não têm produto suficiente para atender este mercado em sua totalidade. Uma pizzaria ou padaria utiliza, em média, o equivalente a 4 toneladas de briquete por mês. Para abastecer a região metropolitana da cidade de São Paulo, necessita-se de 36.400 toneladas por mês de briquetes, o equivalente a 254.800 metros cúbicos de lenha por mês (1 tonelada de briquete é equivalente a 7 m³ de lenha).

Neste contexto, no tocante ao crescimento do uso de biomassas, resíduos lignocelulósicos de origem agroindustrial, como a casca de arroz, estão entre as fontes renováveis abundantes em várias regiões do Brasil, inclusive no sul. E segundo o CONAB (2013), o país encontra-se na nona posição dentre os maiores produtores de arroz.

Segundo Vieira (2014), a casca do arroz, que tem custo reduzido, encontra-se acessível e com ampla disponibilidade para a conversão em produtos com valor agregado. Desta forma, o trabalho busca averiguar o emprego deste resíduo agrícola com vistas à sua transformação em briquete, no intuito de obter um combustível sólido com considerável poder calorífico, e pretende-se amenizar o problema ambiental da disposição deste resíduo em locais inadequados.

1.1 JUSTIFICATIVA

O interesse pelo processo de briquetagem, no Brasil, historicamente esteve voltado para o aproveitamento de finos de carvão vegetal. Paula (2010) aponta a importância de novos estudos nesta área, sendo que o país não possui tradição industrial na produção de combustível sólido como, por exemplo, de briquetes. Isto pode agregar valor aos resíduos agrícolas que, geralmente, são subutilizados, colaborando para a mitigação de problemas ambientais advindos da

disposição em locais indevidos e sem tratamento adequado e, ainda, possibilitar o uso mais eficaz de suas potencialidades energéticas.

No Brasil são produzidas cerca de 1,2 milhão de toneladas (t) de briquetes por ano. Destes, 930 mil t são de madeira e 272 mil t de resíduos agrícolas, como bagaço de cana, palha e casca de arroz, resíduos de caroço de algodão, entre outros (BRAZILIAN ASSOCIATION INDUSTRY BIOMASS AND RENEWABLE ENERGY, 2012, *apud* EMBRAPA, 2012). A taxa de crescimento da demanda de briquete é de 4,4% ao ano, o que demonstra a importância potencial no mercado de energia renovável (SILBERSTEIN, 2011, *apud* EMBRAPA, 2012).

Acrescenta-se também, à problemática ambiental oriunda dos resíduos da casca do arroz, que são gerados volumes consideráveis junto às indústrias de beneficiamento do grão, principalmente nas regiões de produção acentuada e farta. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no ano de 2014, foram produzidas 12.150.309 toneladas de grãos de arroz no Brasil. A região Sul apresentou uma produção de 9.477.269 toneladas e, em Santa Catarina, a produção estimada foi de 1.082.441 toneladas de arroz (IBGE, 2014). O descarte inadequado de resíduos da casca de arroz torna-se um grande problema ambiental em decorrência do crescimento da produção de arroz.

Conforme a IPEA (2012) e Embrapa (2012), estima-se que a cultura do arroz produza cerca de 200 toneladas de biomassa para cada 1 mil toneladas de grãos colhidos. Assim, pode-se considerar que o processamento do arroz gera cerca de 20% de resíduos de casca.

A queima de biomassa deve ser feita de maneira controlada, uma vez que o processo de combustão nunca é completo e, conseqüentemente, lança poluentes atmosféricos (MORAIS, 2007). Estes poluentes podem ser classificados em três grupos: gases que provocam efeito estufa, como dióxido de carbono (CO_2) e hidrocarbonetos, como o metano (CH_4); em gases nocivos que comprometem a saúde e danificam os bens materiais (monóxido de carbono – CO) e em gases que contenham nitrogênio e enxofre com resíduos inertes, como o carvão e cinzas (NOGUEIRA, 2008).

Para a produção energética é importante que a análise química do material apresente elevado teor de carbono fixo e baixa umidade, conseqüentemente, um poder calorífico alto. Quanto menor a umidade do material, maior será a produção de calor por unidade massa (PAULA, 2010). Para constatar e

indicar determinado material como bom gerador de energia, é importante caracterizá-lo através de análises químicas e físicas, bem como seu valor calórico.

1.2 OBJETIVOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foram definidos objetivos geral e específicos.

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver o biocombustível sólido a partir da biomassa da casca de arroz e glicerol como fonte energética.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Desenvolver combustível sólido de casca de arroz, amido, glicerol e ácido acético;
- b) Verificar a composição físico-química ideal dos componentes para o processo de fabricação dos combustíveis sólidos;
- c) Quantificar o teor de umidade dos combustíveis sólidos;
- d) Quantificar o teor de cinzas dos combustíveis sólidos;
- e) Medir capacidade calorífica superior dos combustíveis sólidos;
- f) Medir a capacidade calorífica inferior dos combustíveis sólidos;
- g) Aferir densidade aparente dos combustíveis sólidos obtidos;
- h) Estudar a relação massa/volume;
- i) Verificar a resistência mecânica à compressão dos combustíveis sólidos desenvolvidos;
- j) Monitorar a fumaça utilizando escala de Ringelmann.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico serão descritos conceitos sobre energia, reações de combustão completa e incompleta, características da biomassa, biomassa no Brasil, biomassa de resíduos agrícolas, estrutura e propriedades físicas da biomassa.

2.1 ENERGIA TÉRMICA

Segundo Máximo e Alvarenga (2000), a energia térmica é uma condição de energia que está associada à temperatura absoluta de um sistema, e concorda classicamente à soma das energias cinéticas microscópicas que suas partículas constituintes possuem em virtude de seus movimentos de translação, vibração ou rotação. Assim, a energia térmica iguala-se à soma das energias cinéticas de seus constituintes microscópicos e das energias atreladas às partículas de radiação (fótons térmicos) por ela confinadas.

A energia térmica é a energia associada ao movimento randômico dos átomos e das moléculas. Em geral, pode ser calculada a partir de medidas de temperatura. Quanto mais intenso for o movimento dos átomos e das moléculas em uma amostra de matéria mais quente essa se tornará e maior será sua energia térmica. Contudo, precisamos fazer uma distinção cuidadosa entre energia térmica e temperatura (CHANG, 2006).

2.2 REAÇÃO DE COMBUSTÃO COMPLETA E INCOMPLETA

Combustão é a transformação da energia química dos combustíveis em calor por meio das reações dos elementos constituintes com o oxigênio fornecido. Para fins energéticos, a combustão direta ocorre essencialmente em fogões (cozimento de alimentos), fornos (metalurgia) e caldeiras. Embora prático e, às vezes, conveniente, o processo de combustão direta é normalmente ineficiente (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2005).

A combustão completa é o processo que leva as substâncias combustíveis à sua forma mais oxidada, em compostos orgânicos, todos os átomos de carbono são oxidados formando dióxido de carbono e água. E a combustão incompleta é o processo no qual os produtos de combustão são constituídos, em parte, por formas que representam oxidação parcial dessas substâncias, não tendo oxigênio suficiente e há produção de monóxido de carbono (SERFATY, 2007 *apud* ARRUDA, 2009).

Como exemplo de combustão completa e incompleta a partir do metano (CH_4), seguem as equações químicas abaixo, que são representativas para a maioria dos combustíveis à base de C e H.

A reação completa do metano está descrita na Equação química 1.



As reações de combustão incompleta do metano estão representadas nas Equações 2 e 3.



“Onde o ΔH representa a energia liberada em cada reação” (GARCIA, 2002). Para obter o máximo de calor, deve-se buscar o maior rendimento da combustão. Porém, para o rendimento calorífico atender às necessidades requeridas, é imprescindível que isto seja feito de forma econômica, requerendo uma combustão eficiente em relação à quantidade de ar e a melhor mistura ar combustível, e também com transferência do máximo de calor da combustão para o material a ser aquecido (SERFATY, 2007 *apud* ARRUDA, 2009).

Um evidente problema da combustão direta é a alta umidade (20% ou mais, no caso da lenha) e a baixa densidade energética do combustível (lenha, palha, resíduos, etc.), o que dificulta o seu armazenamento e transporte (ANEEL, 2005).

2.3 BIOMASSA

Biomassa é definida como todo material orgânico de origem vegetal. Este material deriva da reação entre gás carbônico (CO_2 no ar), água (H_2O) e luz solar, ou seja, pelo processo de fotossíntese, que armazena fração de energia solar nas ligações químicas de seus componentes (SOUZA; SORDI; OLIVA, 2002, *apud* COUTO, 2014).

O conceito geral do ponto de vista energético abordado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2005) é que biomassa seria todo recurso

renovável oriundo de matéria orgânica, de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizado para produção de energia.

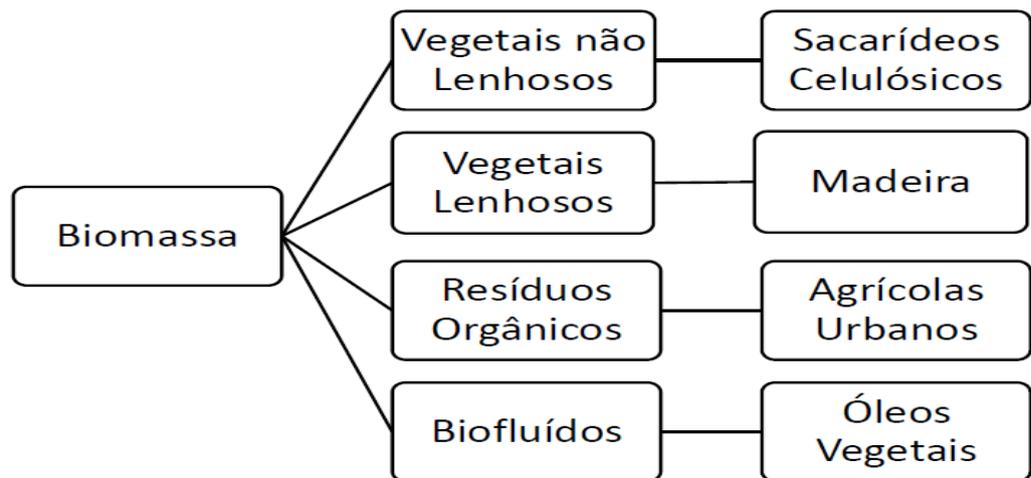
Qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica é classificada como biomassa. De acordo com a sua origem, pode ser: florestal (madeira, principalmente), agrícola (soja, arroz e cana-de-açúcar, entre outras) e rejeitos urbanos e industriais (sólidos ou líquidos, como o lixo). Os derivados obtidos dependem tanto da matéria-prima utilizada (cujo potencial energético varia de tipo para tipo), quanto da tecnologia de processamento para obtenção dos energéticos (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

Quando as ligações entre os átomos de carbono, hidrogênio e oxigênio são quebradas por combustão, digestão, ou decomposição, estas substâncias liberam sua energia química armazenada. A utilização da biomassa como matéria-prima de conversão depende das propriedades químicas e físicas das moléculas (MCKENDRY, 2002 *apud* VIEIRA, 2014).

A biomassa pode ser utilizada diretamente para geração de calor ou de energia elétrica, ou transformada em biocombustíveis sólidos, tais como briquetes e péletes, líquidos como etanol e biodiesel; ou gasosos, a exemplo do biogás e gás de síntese. Aplicando-se diferentes tecnologias é possível transformar estes biocombustíveis em energia nas formas mecânica, térmica ou elétrica, as quais podem ser utilizadas de diversas maneiras para suprir as necessidades das atividades humanas (SAWIN *et al.*, 2012).

Segundo Cortez, Lora e Alyarza (2008), a biomassa voltada para fins energéticos abrange a utilização desses resíduos para a geração de fontes alternativas de energia. Apresenta diferentes tecnologias para o processamento e transformação de energia, mas todas as tecnologias de biomassa atualmente usadas no mundo possuem dois problemas cruciais: o custo da biomassa e a eficiência energética de sua cadeia produtiva.

Figura 1 – Fontes de biomassa



Fonte: Adaptado de Ministério de Minas e Energia (1982, *apud* CORTEZ; LORA; ALYARZA, 2008).

2.3.1 Biomassa no Brasil

Entre as fontes para produção de energia, a biomassa apresenta potencial de crescimento nos próximos anos, de acordo com os estudos de planejamento do Ministério de Minas e Energia (PORTAL BRASIL, 2011). Ela é considerada como uma alternativa viável para a diversificação da matriz energética do país, em complementação aos combustíveis fósseis, como petróleo e carvão (PORTAL BRASIL, 2011).

A geração de energia elétrica, no Brasil, provém essencialmente de duas fontes energéticas, o potencial hidráulico e o petróleo, com grande predominância da primeira. Apesar da importância dessas fontes, o Brasil dispõe de várias alternativas para geração de energia elétrica, dentre as quais aquelas derivadas da biomassa. Em relação à biomassa, há uma grande variedade de recursos energéticos, desde culturas nativas (soja, coco, milho e arroz) até resíduos de diversos tipos (resíduos vegetais, como resíduos da cana de açúcar e arroz). No entanto, a pouca informação a respeito do potencial energético desses resíduos limita seu efetivo aproveitamento (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2002).

2.3.1.1 Glicerol

O glicerol tem apresentado queda do valor por litro com o passar dos anos, bem como seus derivados também apresentam pouco valor agregado. Segundo Lacerda *et al.* (2014), devido ao grande excesso de glicerol formado como coproduto durante a produção de biodiesel, novas oportunidades para o aproveitamento do glicerol na obtenção de produtos químicos de valor agregado têm surgido nos últimos anos, ajudando a promover a viabilidade comercial do biodiesel. O glicerol pode ser convertido em produtos químicos promissores e em combustíveis por meio de catálise química seletiva, tais como oxidação seletiva, hidrogenólise seletiva, desidratação catalítica, pirólise e gaseificação, transesterificação do glicerol e a esterificação seletiva, eterificação seletiva e carboxilação, entre outros processos.

O glicerol, que é um composto oriundo do processo de transesterificação de óleos vegetais e gorduras a biodiesel, representa um coproduto que pode ser aproveitado na melhora das propriedades físico-químicas da mistura combustível, agregando valor ao produto final (LACERDA *et al.*, 2014).

O glicerol ou glicerina, como é conhecido comercialmente, é miscível com água e com álcool e é imiscível em óleos fixos e voláteis. Também não tem reatividade química com a água, possuindo um grau de pureza de até 99,5% (FISPQ, 2007).

2.3.1.2 Biomassa de resíduos agrícolas

O Brasil é considerado um dos maiores produtores agrícolas devido a várias razões, desde a disponibilidade de área para cultivo, possibilidade de introdução de culturas variadas, até a posição geográfica (condições climáticas adequadas), além de sua rica biodiversidade e tecnologia avançada; portanto, como um fornecedor com potencial altíssimo de matérias primas (resíduos) para a produção de bioenergia (VIEIRA, 2012).

Segundo Nonhebel (2007, *apud* VIERA, 2012) as biomassas mais significativas com relação à energia são aquelas obtidas de culturas energéticas e resíduos agrícolas. Estes se originam de material vegetal gerado no sistema de produção de outros produtos.

A cana-de-açúcar é a matéria-prima de maior produção em todo o mundo, produção esta encabeçada pelo Brasil com quase 400 milhões de toneladas (Mt) de produção anual, seguido por Índia, China, Tailândia, Paquistão e México. Segundo o levantamento da CONAB, 2014, no sul do Brasil a produção na safra de 2014/15 foi de 45.184,70 mil toneladas.

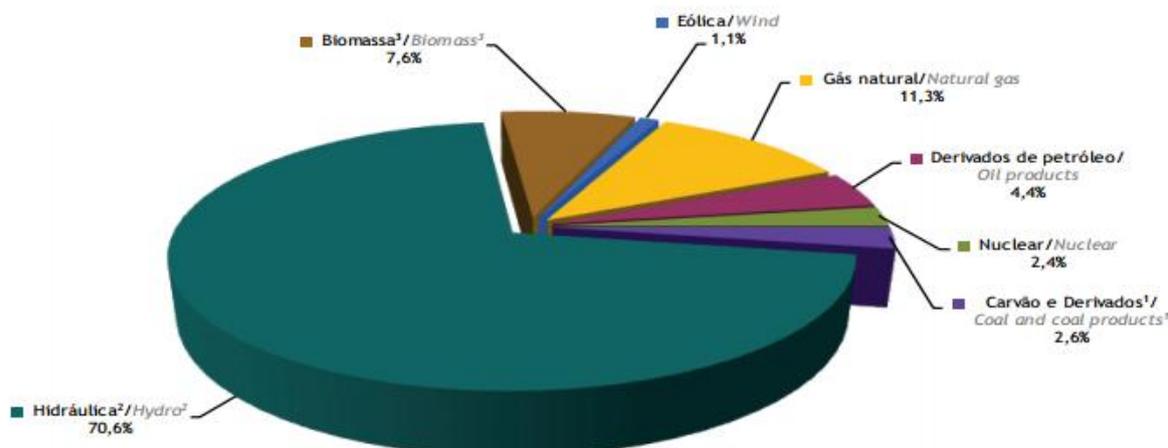
A China é o maior produtor de arroz (187 milhões de Mt), os Estados Unidos são o maior produtor de milho (300 milhões de Mt) e de soja (86 milhões de Mt), a União Europeia é a maior produtora de beterraba com quase 127 milhões de Mt. A Europa e os Estados Unidos são os principais concorrentes do maior produto energético obtido da biomassa, o álcool da cana-de-açúcar, sendo que a beterraba e o milho são utilizados por esses países para a obtenção do produto emergente (CORTEZ, 2008).

A safra Nacional de arroz, segundo o IBGE (2014), supera em 3,3% a obtida em 2013 (11.758.663 t), e as lavouras apresentaram rendimento médio de 5.172 kg/ha. A estimativa para a safra nacional 2015, é esperada uma produção de 12.261.607 toneladas. A região Sul, sendo responsável por 78,7% da produção nacional.

O Estado de Santa Catarina, segundo maior produtor nacional, informa uma produção esperada de 1.084.066 toneladas, em uma área a ser colhida de 148.744 hectares, com rendimento médio de 7.288 kg/ha.

De acordo com o Banco de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em novembro de 2008 existam, no Brasil, 302 termelétricas movidas à biomassa no país, que correspondem a um total de 5,7 GW (gigawatts) instalados. Do total de usinas relacionadas, 13 são abastecidas por licor negro (resíduo da celulose), com potência total de 944 MW; 27 por madeira (232 MW); três por biogás (45MW); quatro por casca de arroz (21 MW), e 252 por bagaço de cana (4 mil MW) (ANEEL, 2008). Lora e Andrade (2004, *apud* SOARES *et al.*, 2006) apontam que tanto em escala mundial como no Brasil, o potencial energético da biomassa é enorme, podendo se tornar uma das soluções para fornecimento de eletricidade em comunidades isoladas, incentivando o desenvolvimento de atividades extrativistas sustentáveis que contribuam para o desenvolvimento destas comunidades. O gráfico 1 mostra a oferta interna de energia elétrica por fonte.

Gráfico 1 - Oferta interna de energia elétrica na fonte



Fonte: Balanço Energético Nacional, 2014.

Segundo o gráfico acima, a oferta de Biomassa para geração de energia representa, atualmente, 7,6% da matriz energética brasileira, ocupando a terceira posição, atrás da predominante fonte hidrúlica, com 70,6%, e do gás natural, que participa com 11,3%. Especificamente no segmento biomassa, que abrange resíduos agrícolas e agroindustriais, além de florestas energéticas, números oficiais confirmam o protagonismo da geração a partir do bagaço de cana-de-açúcar.

2.3.2 Estrutura da biomassa

Basicamente, a biomassa é um hidrocarboneto, o qual possui átomos de oxigênio na sua composição química. A presença desse átomo faz com que a biomassa requeira menos oxigênio do ar no processo de combustão; mas, conseqüentemente, sua quantidade de energia a ser liberada é reduzida, diminuindo seu Poder Calorífico Superior (ECKERT *et al.*, 2013).

A celulose, hemicelulose e lignina são os componentes predominantes da biomassa vegetal, no caso a casca de arroz, visto que o teor de celulose varia de 40 a 50%, a hemicelulose de 20 a 40%, e o teor de lignina de 25% (MARTINI, 2009).

Para a composição casca de arroz e amido, o poder aglutinante da celulose e hemicelulose demonstra que a celulose, principal componente dessas fibras vegetais, é um homopolímero linear composto de unidades de anidroglicose, as quais são ligadas entre si através de ligações β -(1-4)-glicosídicas, e possui estrutura fibrilar e módulo de elasticidade relativamente alto. A maior parte desse resíduo agroindustrial é utilizada na indústria para geração de energia; o excedente pode ser utilizado em outras aplicações mais nobres, por exemplo, como reforço em materiais compósitos (LUZ; GONÇALVES; DEL'ARCO. JR., 2006, p. 102).

O glicerol (1,2,3-propanotriol) cuja a estrutura também é um hidrocarboneto oxigenado, que possui 3 carbonos, 3 grupos hidroxilo, sendo que dois são primários e outro secundário (Fontes e Alçada, 2010).

2.3.3 Propriedades físicas da biomassa

Propriedades como a massa específica, densidade, teor de umidade, teor de cinza e poder calorífico influenciam na utilização da biomassa como fonte energética. Deste modo, devem ser medidas as propriedades deste material.

2.3.3.1 Massa específica

A Massa específica pode ser separada em massa específica ou massa específica aparente. A Massa Específica de uma substância é a razão entre a massa de uma quantidade da substância e o volume, sem considerar os poros permeáveis à água (VIEIRA, 2012; PRÄSS, 2013, *apud* COUTO 2014).

Já na Massa Específica Aparente é a razão entre a massa de uma quantidade da substância e o volume, sendo que está incluindo os poros permeáveis à água. (ECKERT *et al.*, 2013).

2.3.3.2 Densidade

Determina-se a densidade como a razão entre a massa específica por unidade de volume. É definida como massa por unidade de volume. Líquidos e sólidos são substâncias normalmente incompressíveis, e a variação de sua densidade com a pressão é desprezível. A densidade dos mesmos depende mais da temperatura do que da pressão (YUNUS; CIMBALA, 2015).

A densidade pode ser classificada como real ou aparente. Na densidade real ou relativa considera apenas o volume do conjunto que compõe a amostra, sem considerar o espaço vazio. Já na densidade aparente considera o volume total da amostra, inclusive o espaço vazio entre os grãos que a compõem (SAMPAIO E SILVA, 2007).

2.3.3.3 Teor de umidade

“O teor de umidade indica a quantidade de água presente no material” (QUIRINO *et al.*, 2005).

Na geração de energia a partir da biomassa, o teor de umidade deve ser observado no produto final. Se menor a umidade, maior será a produção de calor por unidade de massa, pois parte da energia liberada na combustão é gasta na vaporização da água. Se o teor de umidade for alto, poderá dificultar o processo de combustão (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2012).

O teor de umidade segundo estudos, sugerem que fiquem entre 15-20% para a queima, visto que valores superiores reduzem o valor do calor de combustão, a temperatura da câmara de queima e a temperatura dos gases de escape (GONÇALVES *et al.*, 2009, *apud* EMBRAPA, 2012). Valores de umidade acima de 15% podem levar à quebra do briquete ou à degradação biológica durante o transporte e armazenamento. Por outro lado, baixo teor de água (<5%) pode resultar em perda de material, bem como sua quebra, geração de finos durante o transporte e armazenamento.

2.3.3.4 Teor de cinzas

Conforme Nogueira e Rendeiro (2008), citados por Vieira (2012), os resíduos que resultam da combustão são materiais inorgânicos e são ditos teor de cinzas. Portanto, as cinzas são resultadas da combustão da biomassa, no qual é adquirida em temperaturas. As mesmas podem originar-se de elementos metálicos e sais já presentes no combustível e que possam estar na biomassa e, ainda, por solos misturados à biomassa durante seu manuseio. Por isso é muito importante o conhecimento da composição destas cinzas para evitar ações inadequadas.

“As cinzas vegetais possuem cálcio, magnésio, fósforo e outros elementos, alguns essenciais para o desenvolvimento dos seres vivos, como Cu, Zn, Mg e B” (OSAKI; DAROLT, 1991).

O teor de cinzas é a percentagem em massa de cinzas após a queima completa do briquete. A maioria dos resíduos de biomassa tem baixo teor de cinzas, exceto a casca de arroz, que pode conter até cerca de 25% de cinzas, devido ao alto

poder de sílica da matéria-prima (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2012).

2.3.3.5 Poder calorífico

O Poder Calorífico é a quantidade de calor liberada pela combustão completa da unidade de massa (ou volume) do combustível (QUIRINO, 2011 *apud* COUTO, 2014). Quando ocorre combustão completa de uma unidade de combustível, este libera energia térmica e é, geralmente, medido em termos da energia por conteúdo por unidade de massa ou volume, então Mj/kg (sólidos), Mj/l para líquidos e, por fim, para gases Mj/Nm³.

De maneira geral, essa propriedade depende da composição da biomassa e do seu grau de umidade (NOQUEIRA, 2003, *apud* VIEIRA, 2012). O poder calorífico é dito superior (PCS) quando a combustão ocorre a volume constante, e a água formada na combustão é condensada (CÔTÉ, 1968 *apud* SANTOS, 2012). O poder calorífico inferior (PCI) é resultante da combustão sob pressão constante, ao ar livre, sem a condensação da água formada e, deste modo, seu valor é menor que a PCS (SANTOS, 2012). O Poder Calorífico Superior ou Inferior de certa biomassa é a propriedade físico-química mais importante a considerar para a escolha de um processo termoquímico (CARIOCA, 1985, *apud* VIEIRA, 2012).

Stolf (2013, *apud* VIEIRA, 2014) ressalta que o PCS ocorre quando a água advinda da queima está no estado líquido. Assim, a partir do PCS subtrai-se a energia gasta para evaporar o hidrogênio de formação do combustível na forma de água (H₂O), com isto é obtido o poder calorífico inferior (PCI), sendo este considerado a energia efetiva de um combustível.

2.3.3.6 Escala de Ringelmann

A escala de Ringelmann consiste em uma escala gráfica para avaliação colorimétrica de densidade de emissões atmosféricas por motores diesel. A escala foi adotada pela indústria automobilística desde o surgimento dos veículos movidos a óleo diesel. A escala de Ringelmann tem seis graduações de cores, indo do branco ao preto e contendo, entre elas, quatro variações de cinza. O branco significa

0% de densidade de emissões atmosféricas, e os tons de cinza vão do mais claro, nível 1 igual a 20%, nível 2 igual a 40%, nível 3 igual a 60%, nível 4 igual a 80%; o preto corresponde ao nível 5, igual a 100% de densidade de emissões atmosféricas. De acordo com a Resolução 510/77 do CONTRAN, o máximo permitido para emissões atmosféricas por motores diesel é o nível 2, igual a 40%. A escala de Ringelmann pode não apresentar um resultado confiável, pois admite a incerteza e a imprecisão do observador humano. A interpretação do padrão está ligada a outros fatores, como temperatura, clima e, principalmente, a visão e percepção do observador. Cada observador pode fazer uma interpretação diferente (FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO, 2012).

Gráfico com uma série de ilustrações, indo do cinza claro até o preto. É usado para medir a opacidade da fumaça emitida de chaminés e outras fontes. Os tons de cinza simulam várias densidades de fumaça e são numerados (os tons cinza) de 1 a 5. Ringelmann n.1 é equivalente a uma densidade de 20% e o n.5, a uma de 100% (LEMOS; GOMES, 2008, p. 83).

A escala de Ringelmann foi utilizada para mesurar a fumaça de combustão dos combustíveis sólidos, levando em consideração que seus constituintes são hidrocarbonetos oxigenados e não contém enxofre, o que torna menos tóxica do que a fumaça da combustão do diesel.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização do trabalho foi utilizado o método quantitativo, que tornou possível descrever em detalhes as prováveis causas e ocorrências durante a realização dos experimentos. O método quantitativo, segundo Richardson (1999), caracteriza-se pelo emprego da quantificação, tanto nas modalidades de coleta de informações, quanto no tratamento delas por meio de técnicas, por exemplo, estatísticas. O trabalho trata de um estudo de caso, tendo em vista que a técnica de pesquisa utilizou um objeto único. Diferente das comparativas, a pesquisa que se desenvolve pela técnica do estudo de caso busca o aprofundamento de um único fenômeno.

Os experimentos foram realizados no laboratório de Química das Engenharias, no laboratório de Engenharia Ambiental e no laboratório de Solos na Universidade do Sul de Santa Catarina, no Campus Pedra Branca.

O objeto do estudo foi desenvolver blocos de casca do arroz, resíduo agrícola com potencial para aproveitamento e reutilização para produção de energia, tendo como foco o desenvolvimento de combustível sólido.

Os blocos foram desenvolvidos seguindo o fluxograma 1.

Figura 2 - Fluxograma de desenvolvimentos dos combustíveis sólidos.



Fonte: Da autora, 2015.

3.1 MATÉRIA-PRIMA

Como matérias-primas para a produção de combustíveis sólidos foram utilizadas a biomassa da casca de arroz e do amido de milho, e também o glicerol, coproduto da produção de biodiesel.

A casca de arroz foi utilizada no tamanho conforme recebida e moída. A casca moída foi obtida por trituração em liquidificador Britânia Diamante Filter 400 W, e passou por classificação granulométrica por peneiramento com peneiras SOLOTEST com malha de 2,00mm, 1,4 mm e 1,00 mm, sendo utilizadas partículas de tamanho menores que 2 mm.

Foi utilizado amido de milho em pó da marca Fungini® e o glicerol da marca Vetec®. A água utilizada foi destilada, sendo que todos os reagentes foram usados conforme recebidos e de acordo com as recomendações de segurança.

O glicerol ou propano-1,2,3-triol é líquido à temperatura ambiente (25°C), higroscópico, inodoro, viscoso e de sabor adocicado. O glicerol está presente em

todos os óleos e gorduras de origem animal e vegetal em sua forma combinada, ligado a ácidos graxos (ácido esteárico, oleico, palmítico e láurico) para formar a molécula de triacilglicerol. O glicerol é gerado na produção de biodiesel, durante o processo de transesterificação. A glicerina é considerada uma matéria-prima de alto valor agregado, sendo empregada em ampla variedade de produtos na indústria de cosméticos, produtos químicos, alimentícia e farmacêutica. A glicerina ainda pode ser utilizada como matéria-prima para a produção de Etanol, para ser utilizado no próprio processo de transesterificação; Propeno, para produção de plástico (polipropileno); e Éteres, a serem usados como aditivos na gasolina e diesel (INTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL, 2013).

3.2 PREPARAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS

Foi preparada uma mistura de casca de arroz e amido de milho em água para a produção dos combustíveis sólidos. Também foram produzidos corpos de prova em que, para cada quilograma de massa, usou-se uma porcentagem de 20% ml de glicerol e/ou ácido acético. Os briquetes foram confeccionados em triplicata com os componentes e proporções apresentadas na Tabela 1, e denominados corpo de prova 1 a 12.

Tabela 1 – Composição dos combustíveis sólidos

TIPO	Composição: Casca de arroz moída (50g) e amido (10g) em 100ml de água	
	Glicerol	Ácido acético
Corpo de Prova 1, 2 e 3	--	--
Corpo de Prova 4, 5 e 6	--	10ml
Corpo de Prova 7, 8 e 9	10ml	--
Corpo de Prova 10, 11 e 12	10ml	10ml

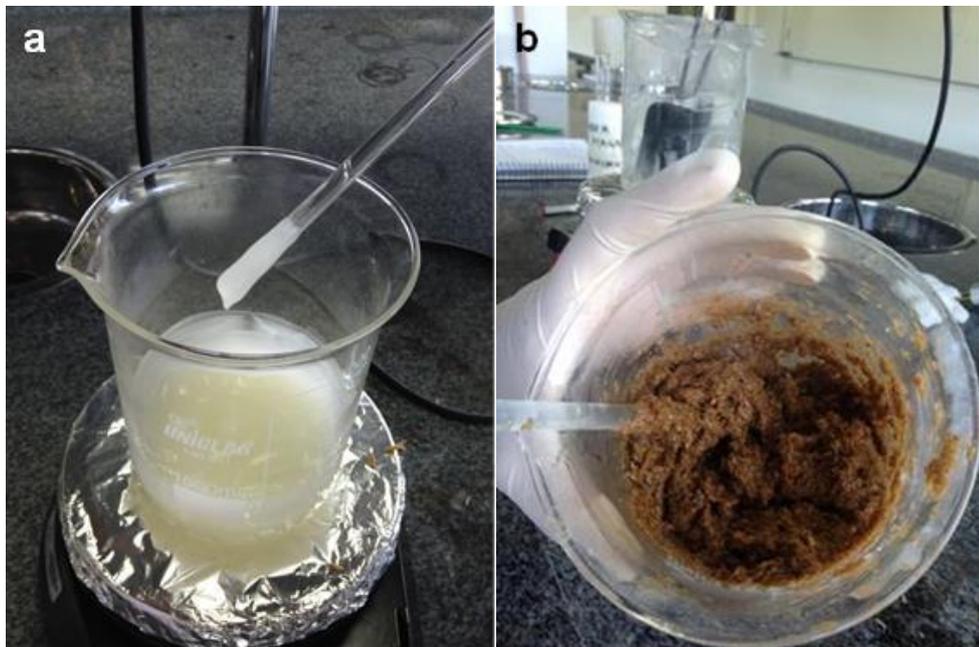
Fonte: Da autora, 2015.

A produção de corpos de prova adotou formato cilíndrico nas dimensões de 4,5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, para atender a norma ASTM D 63890.

Deste modo, têm-se corpos de prova nas dimensões necessárias para teste mecânico de compressão.

Para cada corpo de prova produzido pesou-se 50 g de casca de arroz moída com precisão em gramas, e granulometria de 2,00 mm. Também foram pesados 50g de amido de milho, que foi misturado manualmente em 100 ml de água e aquecido em chapa de aquecimento por cerca de 10 min. Obteve-se, assim, uma mistura com aspecto de gel (Figura 2a), que foi misturada à casca de arroz em temperatura de 200°C (Figura 2b).

Figura 3 – (a) Gel obtido a partir da mistura de 10 g amido em 100 ml de água; (b) adição de casca de arroz na mistura amido em água



Fonte: Da autora, 2015.

Para os corpos de prova cuja composição apresentou glicerol e/ou ácido acético (Tabela 1), estes reagentes foram adicionados ao gel de amido, homogeneizados para, então, serem incorporados à casca de arroz.

O processo de homogeneização para todas as misturas foi manual, com aquecimento de 250°C por 10 min.

A mistura foi direcionada para os moldes (Figuras 3a e 3b) com medidas de 10 cm de altura e 4,5 cm de diâmetro, e depois, com o auxílio de uma espécie de molde, onde o pistão elevava-se verticalmente até a parte superior da prensa, a pressão manual aplicada fez com que os tubos maciços deslizassem no interior do

corpo de prova, promovendo a densificação. O tempo necessário de compactação, em média, foi de um minuto.

Figura 4 – (a) Molde utilizado para fabricação do material; (b) Molde utilizado para fabricação do material inicial



Fonte: Da autora, 2015.

Os corpos de prova, após a densificação, foram colocados na estufa (Figura 4) por 48 horas com temperatura de 105 ± 2 °C para secagem.

Figura 5 – Secagem dos corpos de prova em estufa



Fonte: Da autora, 2015.

Os corpos de prova foram produzidos em dimensões e quantidade apropriadas para a realização das análises de Teor de Umidade, Densidade Aparente, Teor de Cinzas, Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI), emissão de fumaça pela Escala de Ringelmann e análise de Infravermelho.

3.3 TEOR DE UMIDADE

O corpo de prova foi pesado com a balança de precisão previamente tarada, e levado à estufa a uma temperatura de $105 \pm 2^\circ\text{C}$. Este foi retirado da estufa e resfriado em dessecador com cloreto de cálcio anidro e pesado. A operação de aquecimento e resfriamento foi repetida até peso constante, conforme NBR 8112/86. Foi usada a Equação 4:

$$TU (\%) = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100 \quad (4)$$

Sendo: m_0 a massa inicial e m_1 a massa final, ambas expressas em gramas.

3.4 TEOR DE CINZAS

A amostra foi colocada em uma cápsula de porcelana isenta de umidade. Esta foi transferida a um cadinho, previamente seco e tarado, e levado à mufla ($700 \pm 10^\circ\text{C}$) por um período de 3 horas. Após este processo, o material foi resfriado em dessecador com cloreto de cálcio anidro até massa constante. O teor de cinzas pode ser expresso pela seguinte Equação 4:

$$CZ (\%) = \frac{M_1 - M_0}{m} \times 100 \quad (5)$$

Sendo: CZ o teor de cinzas em %; M_0 a massa do cadinho; M_1 a massa do cadinho adicionado à massa do resíduo após combustão; e m a massa da amostra seca, expressos em gramas.

3.5 VOLUME DOS COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS

Considerando que o diâmetro do corpo de prova era de 4,25 cm e sua altura de aproximadamente 7,6 cm, através da Equação 5 calculou-se o volume dos combustíveis sólidos.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (6)$$

Sendo: V o volume do combustível sólido em cm^3 , r o raio em cm ; e h a altura do combustível sólido.

3.6 DENSIDADE APARENTE

A densidade aparente foi calculada através da massa do corpo de prova e o seu volume, conforme Equação 6:

$$D = \frac{m}{v} \quad (7)$$

Sendo: m a massa do corpo de prova e v o volume do corpo de prova.

3.7 PODER CALORÍFICO SUPERIOR E INFERIOR

Foi utilizado o método descrito em pesquisas da Embrapa, cuja referência foi a FAO, Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura, que propõe que o valor calorífico da madeira, em MJ/kg , e da maior parte dos resíduos agroflorestais pode ser calculado usando a seguinte Equação 7:

$$\text{PCS} = 20,0 \times (1 - A - M) \quad (8)$$

Sendo: PCS igual ao Poder calorífico superior em MJ/kg , em que A é o teor de cinzas e M é o teor de umidade do combustível, medidos na prática.

O poder calorífico inferior ou líquido (PCI) leva em conta a energia não recuperada a partir do vapor de água residual, partindo da oxidação do conteúdo de hidrogênio. O poder calorífico inferior pode ser calculado segundo a Equação 8:

$$\text{PCI} = 18,7 \times (1 - A) - 21,2 \times M \quad (9)$$

Sendo: Poder calorífico inferior em MJ/kg , em que A é o teor de cinzas e M é o teor de umidade do combustível, medidos na prática.

3.8 RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO

Para a realização do ensaio mecânico de compressão, os corpos de prova em formato cilíndrico tinham diâmetro de 4,5 cm e altura de 10 cm . O ensaio

foi realizado em prensa CBR, modelo Fortest, capacidade de até 5.000 kgf. Os corpos de prova foram submetidos a incrementos de pressão até a deformação plástica do material à temperatura ambiente.

A carga foi aplicada no sentido vertical dos corpos de prova, perpendicular à pressão de compactação, sendo os dados coletados para gerar os gráficos de tensão (unidade) versus composição.

3.9 MONITORAMENTO DE FUMAÇA

Os corpos de prova foram colocados dentro de uma cápsula de porcelana, foram queimados e a fumaça foi avaliada pela escala de Ringelmann. O experimento foi conduzido por cerca de 10 min em capela de exaustão; as imagens da fumaça foram capturadas e comparadas à escala, utilizando o programa SMOKESHOT.

3.10 ANÁLISE DE INFRAVERMELHO

Os espectros de infravermelhos foram registados em um espectrômetro Perkin-Elmer (modelo 781), 2 mg da amostra foi misturada em 5 mg de KBr e preparado no formato de discos por prensagem para leitura direta no espectrômetro, realizados na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). A espectroscopia no infravermelho é um tipo de espectroscopia de absorção, em que a energia absorvida encontra-se na região do infravermelho do espectro eletromagnético. Como as demais técnicas espectroscópicas, ela pode ser usada para identificar um composto ou investigar a composição de uma amostra. Baseia-se no fato de que as ligações químicas das substâncias possuem frequências de vibração específicas, as quais correspondem a níveis de energia da molécula (chamados, nesse caso, de níveis vibracionais) (SILVERSTEIN; BASSLER; MORRIL, 1994).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este tópico descreve a preparação de 12 corpos de prova com casca de arroz triturada, amido de milho em água, com ou sem adição de glicerol e/ou ácido acético. O trabalho mostrou a preparação dos combustíveis sólidos, sendo que serão apresentados os resultados experimentais acerca do potencial energético dos biocombustíveis sólidos produzidos com a biomassa vegetal, Estão relatados o teor de umidade, teor de cinzas, poder calorífico superior e inferior, bem como o monitoramento da fumaça.

Bem como foi avaliado a resistência mecânica a compressão com relação a composição dos combustíveis sólidos.

O interesse na preparação de combustíveis sólidos derivados da casca de arroz, amido de milho e glicerol reside em explorar a capacidade destes materiais de formar material sólido compacto que seja apropriado para o uso de biocombustível sólido. Os combustíveis confeccionados encontram-se na figura 5.

Figura 6 – Combustíveis sólidos confeccionados



Fonte: Da autora, 2015.

4.1 PREPARAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS

Com o foco em desenvolver combustível sólido, verifica-se que a umidade natural da casca de arroz era baixa para realizar a mistura dos componentes, sendo necessário acrescentar água para confecção dos mesmos. Segundo Rodrigues (2010) a presença de água nas amostras facilitou a transferência de energia em forma de calor, melhorando a plastificação da lignina dos corpos de prova, aliada aos demais componentes presentes nas amostras. Isto

ocorre porque a água é melhor condutora de calor quando comparada com o ar, conseqüentemente, favorece a formação dos briquetes.

A mistura dos componentes foi homogeneizada e aquecida a uma temperatura próxima aos 250°C durante 7 minutos. Este tempo e temperatura foram fundamentais para efetivar a unificação entre os componentes utilizados, auxiliando durante a moldagem do corpo de prova. A necessidade de aquecimento verificada na prática foi ao encontro dos relatos de Quirino et. al., (2005), Mayer, Hoffmann e Ruppenthal (2006) e Lippel (2013, *apud* VIEIRA, 2014), de que a casca do arroz, quando for submetida para aproveitamento energético por meio da briquetagem, necessita de elevadas pressões e temperatura. Ou seja, a lignina presente na casca de arroz, que age como um adesivo de partículas.

Neste trabalho não foi utilizada pressão para confecção dos combustíveis sólidos, sendo utilizado o amido e o glicerol como aglutinantes, catalisado ou não por ácido acético.

Nas tentativas iniciais de confecção dos combustíveis sólidos, a casca do arroz foi utilizada como recebida, e a massa dos componentes umidificada foi direcionada para os moldes; depois, foi desenformado com auxílio de um pistão. O tempo necessário de compactação, em média, foi de um minuto.

Durante a compactação do material foi verificado que a maior parte do amido e da água foi retirada com a pressão (Figura 6a, que pode ser visualizada na próxima página), também fazendo com que o molde se despedaçasse (Figura 6b, também na próxima página). Outro problema verificado foi que a casca de arroz não proporcionou uma área de contato suficiente para a interação dos componentes da mistura; por fim, o produto obtido foi descartado.

Em nova tentativa foi realizado o mesmo processo, mas a pressão aplicada com esforço manual fez com que os tubos maciços deslizassem no interior do corpo de prova, promovendo a compactação da mistura.

Quanto ao formato dos corpos de prova, salienta-se que, após a compactação, as amostras foram retiradas depois de 30 segundos. A seguir, os corpos de prova foram desmoldados, observando uma expansão durante a etapa de secagem, atribuída ao formato da casca de arroz e área de contato. Ressalta-se que a casca do arroz exhibe propriedade elástica, ou seja, ocorre redução de volume quando prensada, mas retorna ao tamanho original quando liberada a força.

De acordo com Silva (2007), os resíduos que têm dimensões pequenas podem ser aplicados diretamente no processo de briquetagem. Entretanto, os que apresentam dimensões maiores precisam passar por um processo de redução de tamanho, de modo a facilitar a compactação.

Figura 7 – (a) Prensa Hidráulica utilizada para compactação; (b) molde obtido a partir da compactação



Fonte: Da autora, 2015.

Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2012), durante a moagem ocorre a quebra das partículas e também da lignina, aumentando a área de contato, proporcionando ligações mais fortes após a compactação e, conseqüentemente, um produto mais resistente.

Para Koullas e Koukios (1987, *apud* Silva, 2007), quanto menor o tamanho, melhor será a compactação. Partículas com dimensões pequenas são apropriadas pelo fato de abranger uma área maior de superfície e, por conseguinte, promovendo melhor interação.

De acordo com Silva (2007) e Embrapa (2012), bem como verificado na prática, existiu a necessidade de melhorar a interação entre os componentes, então se adotou, para este trabalho, uma granulometria menor de 2mm para a casca de arroz, a qual foi obtida após moagem e classificação granulométrica. Os corpos de prova foram confeccionados segundo descrito na seção de metodologia deste trabalho, e submetidos às análises de Volume, propriedade mecânica de compressão, Densidade Aparente, Teor de Umidade, Teor de Cinzas, Poder

Calorífico Superior (PCS), Poder Calorífico Inferior (PCI), emissão de fumaça pela Escala de Ringelmann e análise de Infravermelho. Foram realizadas médias e desvio-padrão capazes de identificar o *erro* em um conjunto de dados.

4.2 TEOR DE UMIDADE

O teor de umidade total, média e desvio padrão dos 12 corpos de prova obtidos podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 - Teor de Umidade, média e desvio padrão

Composição	Teor de Umidade (%)	Média	Desvio Padrão
Amido			
Corpo de Prova 1	15,02	15,62	1,07
Corpo de Prova 2	14,98		
Corpo de Prova 3	16,85		
Amido e Ácido Acético			
Corpo de Prova 4	21,05	23,58	2,52
Corpo de Prova 5	26,10		
Corpo de Prova 6	23,60		
Amido e Glicerol			
Corpo de Prova 7	17,84	20,94	2,79
Corpo de Prova 8	21,72		
Corpo de Prova 9	23,24		
Amido, Ácido Acético e Glicerol			
Corpo de Prova 10	20,31	24,08	3,26
Corpo de Prova 11	25,83		
Corpo de Prova 12	26,09		

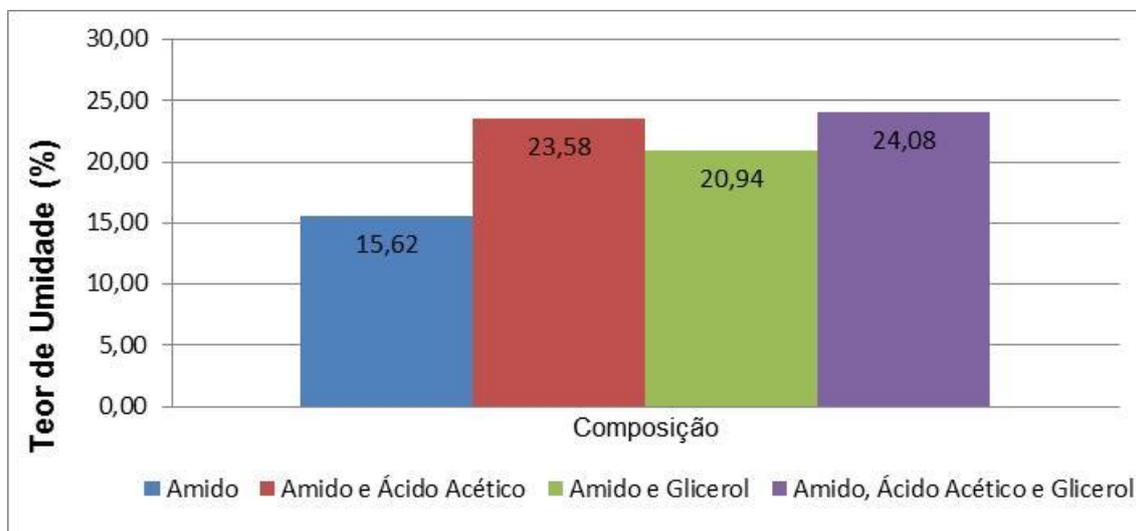
Fonte: Da autora, 2015.

O menor teor de umidade entre as doze amostras foi observado na média das amostras 1, 2 e 3 na tabela 2, para as amostras confeccionadas com casca de arroz e amido; o valor encontrado para o teor de umidade total foi de 15,62%. Entretanto, as amostras 10, 11 e 12 (Tabela 2) apresentaram o maior teor de umidade total (24,08%), quando a composição apresenta todos constituintes.

A média dos teores de umidade total deste estudo ficaram entre 15,62% e 24,08% (gráfico 2, na página seguinte), ou seja, acima de 12,00% informados pela

Biomax (2014) em briquetes de casca de arroz. Isto deve às diferentes matérias-primas, amido, glicerol e ácido acético, também utilizadas.

Gráfico 2 - Média do Teor de Umidade



Fonte: Da autora, 2015.

O teor de umidade pode ser justificado, pois os constituintes da casca de arroz, do amido e o glicerol podem realizar ligações de hidrogênio com a água, desta maneira mantendo a água em sua composição.

Gonçalves *et al.* (2009) sugerem um teor de umidade de 15-20% para a queima, visto que valores superiores reduzem o calor de combustão, a temperatura da câmara de queima e a temperatura dos gases de escape. Ou seja, duas das quatro composições testadas estão de acordo com esta literatura, sendo as composições de casca de arroz e amido e a composição de casca de arroz, amido e glicerol. As composições que foram acrescentadas ácido acético mostram-se com maior teor de umidade (gráfico 1), visto que o ânion acetato (CH_3CO_2^-) pode apresentar-se solvatado pela água, retendo maior quantidade desta na amostra.

Embora a umidade do briquete seja influenciada pelo conteúdo de umidade da biomassa de origem no momento de fabricação, por se tratar de um material higroscópico, o produto densificado também pode ter sua umidade alterada quando não for armazenado em embalagens que vedem a absorção de umidade (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2012 p. 85).

Além disto, segundo a Embrapa (2012), não são desejados valores de umidade acima de 15%, que podem levar à quebra do briquete ou à degradação biológica durante o transporte e armazenamento.

Os resultados das médias do teor de umidade total deste estudo demonstraram teores mais elevados (15,68% - 24,08%) do que o recomendado por Biomax (2014), mas ainda são inferiores à umidade da lenha (25% - 30%). Sendo, portanto, viável o uso como fonte de calor.

4.3 TEOR DE CINZAS

Os problemas de se utilizar matérias-primas alternativas como uma fonte energética estão relacionados com a poluição causada pela combustão, geração de cinzas e emissão de poluentes. Com isto, neste estudo, foi avaliada a geração de cinzas após a combustão dos corpos de prova.

O teor de cinzas, média e desvio padrão dos 12 corpos de prova obtidos podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3 - Teor de Cinzas, média e desvio padrão

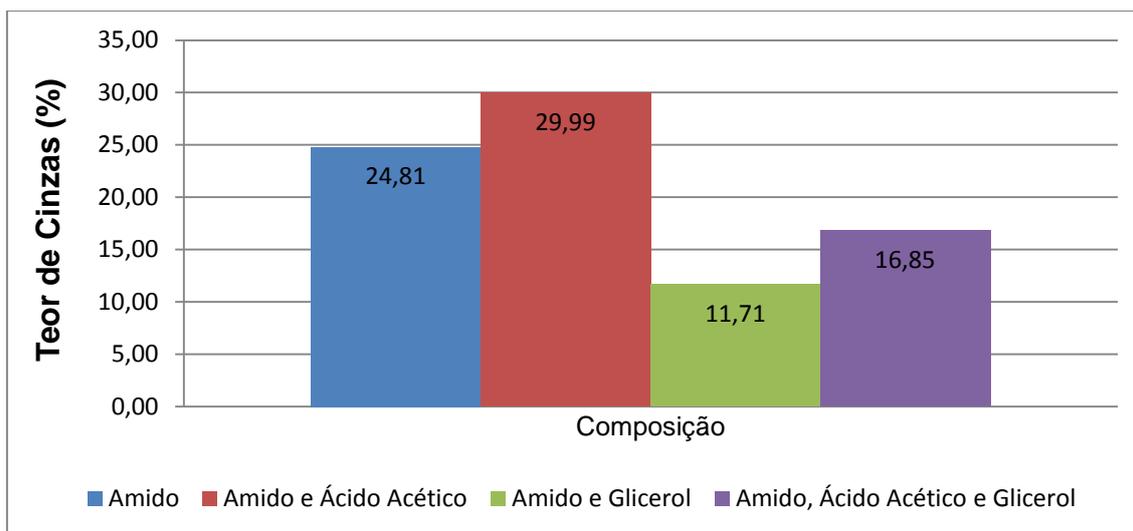
Composição	Teor de Cinzas (%)	Média	Desvio Padrão
Amido			
Corpo de Prova 1	22,93		
Corpo de Prova 2	24,22	24,81	2,24
Corpo de Prova 3	27,28		
Amido e Ácido Acético			
Corpo de Prova 4	18,42		
Corpo de Prova 5	18,39	29,99	20,06
Corpo de Prova 6	53,15		
Amido e Glicerol			
Corpo de Prova 7	9,86		
Corpo de Prova 8	14,92	11,71	2,79
Corpo de Prova 9	10,36		
Amido, Ácido Acético e Glicerol			
Corpo de Prova 10	16,21		
Corpo de Prova 11	16,26	16,85	1,06
Corpo de Prova 12	18,07		

Fonte: Da autora, 2015.

Em relação aos teores de cinzas demonstradas na tabela 3, a triplicata com os menores percentuais de cinzas gerados estão nas amostras com amido e glicerol, como no corpo de prova 7, com 9,86%, e no corpo de prova 9, com 10,36%.

As médias dos teores de cinzas estão também apresentados no Gráfico 3, que foram de 11,71% para amostras acrescida a casca de arroz, amido e glicerol; a 29,99% para amostras contendo amido e ácido acético, sendo as composições com glicerol as que menos apresentam cinzas.

Gráfico 3 - Média do Teor de Cinzas



Fonte: Da autora, 2015.

Os constituintes dos combustíveis sólidos foram pensados de forma que não contribuísse para o aumento do teor de cinzas presente para casca de arroz. O amido cuja fórmula molecular é $(C_6H_{10}O_5)_n$, o glicerol de fórmula molecular $C_3H_8O_3$, e ácido acético, fórmula molecular $C_2H_4O_2$ não são responsáveis por teores de cinza elevados, tendo em vista que seus constituintes são todos hidrocarbonetos oxigenados que, durante o processo de combustão completa, geram CO_2 e H_2O e apresentam elevado grau de pureza. Os teores de cinza obtidos nos corpos de prova (gráfico 3) são justificados pelos compostos inorgânicos presentes na casca do arroz, principalmente a sílica.

Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2012), a maioria dos resíduos de biomassa tem baixo teor de cinzas, exceto a casca de arroz, que pode conter até cerca de 25% de cinzas devido ao alto conteúdo de sílica da matéria-prima.

A maioria dos corpos de prova preparados apresentaram valor de teores de cinzas inferiores ao recomendado pela Embrapa (2012), sendo as misturas que contêm amido (1 e 2, tabela 3), amido e ácido acético (4 e 5, na tabela 3), amido e glicerol (7,8 e 9, tabela 3), amido, glicerol e ácido acético (10,11 e 12, tabela 3),

também apresentaram valores de cinzas inferiores aos avaliados por Moraes *et al.* (2006), teores de 42,16% em briquetes de carvão de cascas de arroz.

Nos experimentos realizados constatou-se que os materiais que tiveram a adição de glicerol na constituição resultaram em médias de teores de cinza entre 11,71% e 16,85%. O glicerol é um líquido com ponto de ebulição de 290 °C e com baixa pressão de vapor de 5 mmHg a 150 °C, fatores que determinam o acréscimo da temperatura de ebulição, sendo o ponto de fusão de 17,9 °C e o ponto de ponto de fulgor de 176 °C (FISPQ, 2007). Deseja-se que o glicerol não evapore, mas que sofra reação de combustão para não comprometer a eficiência energética do material desenvolvido.

Na avaliação dos resultados deste estudo, sabe-se que as cinzas são substâncias com presença de material inorgânico e têm relação inversa com o poder calorífico. O teor de cinzas corresponde à porcentagem de material inerte na geração de calor presente na amostra. As amostras deste estudo apresentaram valores entre 9,86 e 27,28%, exceto o corpo de prova 6, com valor de 53,15%.

Segundo Mande, 2009 *apud* Embrapa 2012, os altos teores de cinzas podem levar à corrosão e desgastes dos equipamentos, o que se torna mais crítico quando o teor de cinzas for superior a 4%.

Por isto, almeja-se que, após a queima dos corpos de prova, haja a menor quantidade de resíduos possíveis, indicando que grande parte do material foi utilizada na geração de calor, sobrando apenas as cinzas.

Como destino final do resíduo da combustão, as cinzas podem ser utilizadas como corretor de nutrientes e pH do solo, para promover a elevação à resistência a várias doenças fúngicas, entre outras pragas. Bem como ser utilizada na construção civil, como fonte de sílica reativa para o cimento; também na indústria farmacêutica e de cosméticos (RAMBO, 2009). Ainda pode ser utilizada em pneus, já que é rica em sílica.

4.4 PODER CALORÍFICO SUPERIOR

O poder calorífico superior (PCS), como já descrito neste trabalho, é aquele em que a combustão se efetua a volume constante, no qual a água formada durante a queima condensa e o calor é recuperado. O Poder Calorífico Superior,

média e desvio padrão dos 12 corpos de prova obtidos estão descritos na tabela 4, sendo que os valores foram na faixa de 4,65 MJ/kg a 14,46 MJ/kg.

Tabela 4 - Poder Calorífico Superior em MJ/kg, média e desvio padrão

Composição	PCS (MJ/Kg)	Média	Desvio Padrão
Amido			
Corpo de Prova 1	12,41		
Corpo de Prova 2	12,16	11,91	0,65
Corpo de Prova 3	11,17		
Amido e Ácido Acético			
Corpo de Prova 4	12,11		
Corpo de Prova 5	11,10	9,29	4,05
Corpo de Prova 6	4,65		
Amido e Glicerol			
Corpo de Prova 7	14,46		
Corpo de Prova 8	12,67	13,47	0,91
Corpo de Prova 9	13,28		
Amido, Ácido Acético e Glicerol			
Corpo de Prova 10	12,69		
Corpo de Prova 11	11,58	11,81	0,79
Corpo de Prova 12	11,17		

Fonte: Da autora, 2015.

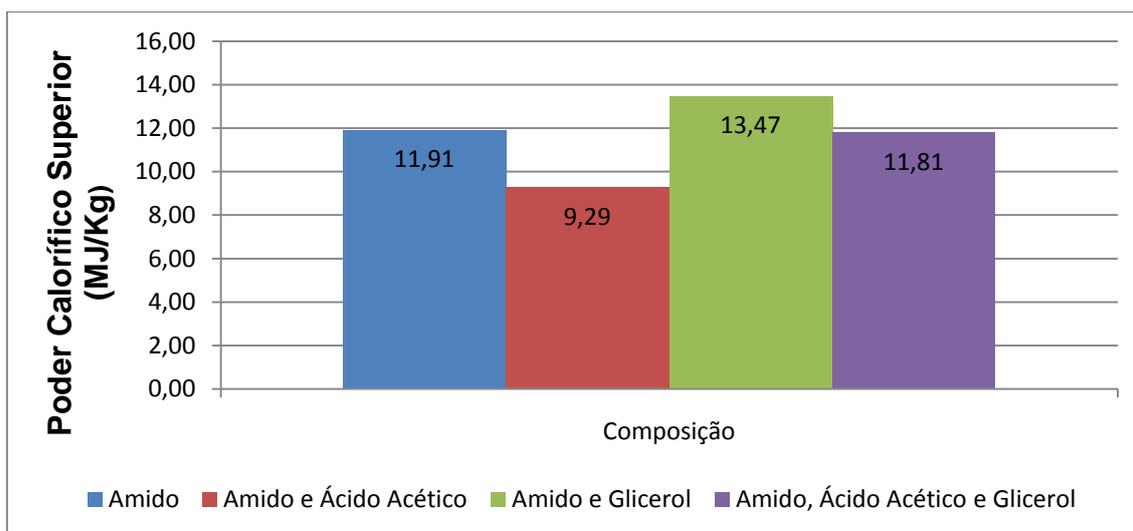
Os valores obtidos para a média do PCS dos materiais obtidos podem ser observados no gráfico 4. Constatou-se que os corpos de prova produzidos com glicerol apresentaram maiores valores do PCS, que foram de 11,17 – 14,46 MJ/Kg (2.667,5251- 3.453,8872 kcal/kg); desta forma, as propriedades físicas do glicerol levam à combustão e não à evaporação durante o processo de queima. Os menores valores foram constatados nas amostras compostas por amido e ácido acético, conforme demonstrado na Tabela 4 e no gráfico 4.

Segundo Vantagens, 2012, os briquetes com resíduos de casca de arroz ficam com o Poder Calorífico em 15,90 MJ/Kg (3.800 kcal/kg), os desenvolvidos apresentaram valores menores, mas chegaram a 14,46 MJ/Kg (3.453 kcal/kg).

Levando em consideração os valores mais baixos de cinzas que foram encontrados nas amostras com amido e glicerol, de 9,85 – 14,92 %, o teor de umidade foi de 17,84 – 23,24 % e valores caloríficos na faixa de 13-14 MJ/Kg, e PCI

na faixa de 11-13 MJ/Kg, não estão de acordo com os materiais com baixos teores de cinzas e teor de umidade entre 10% e 15%, descrito para maioria dos briquetes de madeira e resíduos agroindustriais. Os valores resultantes caloríficos são encontrados na faixa de 17-18 MJ/kg para PCS, e para PCI na faixa de 15,4-16,5 MJ/kg (FAO, 2012).

Gráfico 4 - Média do Poder Calorífico Superior em MJ/kg



Fonte: Da autora, 2015.

Para Quirino (1991), os briquetes possuem no mínimo cinco vezes mais energia que os resíduos que os originaram, e seu poder calorífico é superior ao da lenha.

Portanto, os resultados do Poder Calorífico Superior dos corpos de prova ficaram abaixo do esperado; entretanto, é possível afirmar que estes valores ocorreram devido à alta umidade existente no corpo de prova. Para melhorar os resultados é necessário diminuir o teor de umidade dos combustíveis sólidos.

4.5 PODER CALORÍFICO INFERIOR

O Poder Calorífico Inferior (PCI) é a energia livre por unidade de massa de um combustível, após deduzidas as perdas com a evaporação da água (JARA, 1989). Por isso, é fundamental avaliar o PCI de um combustível, pois é a forma de quantificar a energia efetiva do material.

O Poder Calorífico Inferior, média e desvio padrão dos 12 corpos de prova obtidos estão descrito na Tabela 5. Os valores encontrados, na faixa de 9,79 – 13,07 MJ/Kg (2338,3601 - 3122,8533 Kcal/Kg), foram satisfatórios.

Tabela 5 - Poder Calorífico Inferior em MJ/Kg, média e desvio padrão.

Composição	PCI (MJ/Kg)	Média	Desvio Padrão
Amido			
Corpo de Prova 1	11,23		
Corpo de Prova 2	10,99	10,75	0,64
Corpo de Prova 3	10,03		
Amido e Ácido acético			
Corpo de Prova 4	10,80		
Corpo de Prova 5	9,73	8,09	3,79
Corpo de Prova 6	3,76		
Amido e Glicerol			
Corpo de Prova 7	13,07		
Corpo de Prova 8	11,30	12,07	0,91
Corpo de Prova 9	11,83		
Amido, Ácido Acético e Glicerol			
Corpo de Prova 10	11,36		
Corpo de Prova 11	10,18	10,44	0,82
Corpo de Prova 12	9,79		

Fonte: Da autora, 2015.

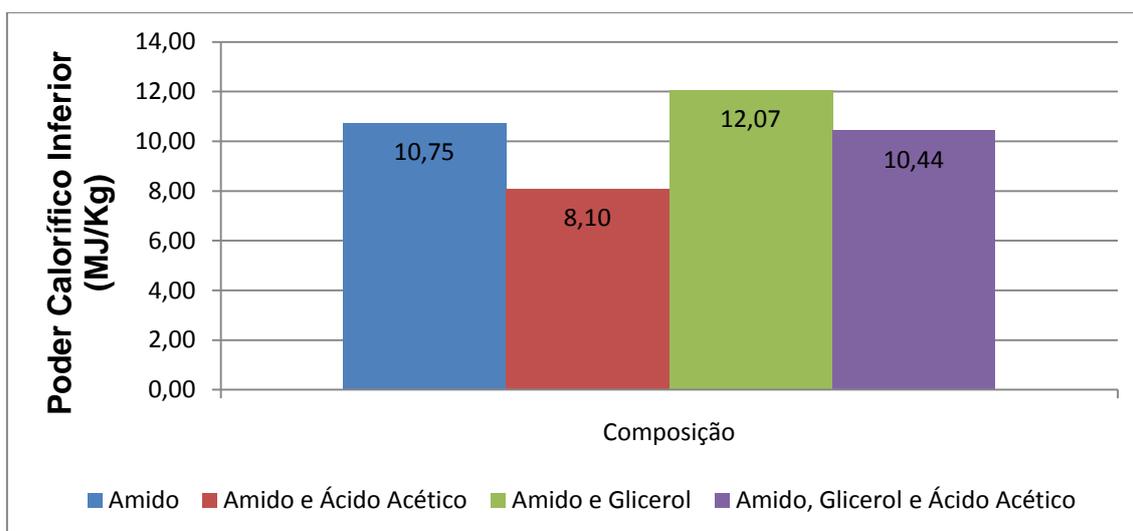
Segundo FAO (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, 2012, *apud* EMBRAPA, 2012), o Poder Calorífico Inferior ou líquido (PCI) leva em conta a energia não recuperada a partir do vapor de água residual, partindo da oxidação do conteúdo de hidrogênio. Muitas vezes é utilizado para fins de referência, especialmente em aplicações industriais.

Quanto ao PCI deste estudo, o gráfico 5 mostra que as médias dos corpos de prova produzidos variaram de 8,10 a 12,07 MJ/kg. O valor mais satisfatório foi encontrado com amido e glicerol, que ficaram com valores entre 11,30 - 13,07 MJ/kg (Tabela 5), variando pouco com as amostras que continham amido, glicerol e ácido acético.

Portanto, pode-se afirmar que a casca de arroz é responsável pelo teor de cinzas nas amostras, e que os demais componentes (amido, glicerol e ácido acético) influenciaram significativamente no PCI dos corpos de prova.

É possível assegurar que, em relação ao potencial de energia das médias determinadas nos corpos de prova deste estudo, que foram de 10,75 – 12,07 MJ/Kg (2.494,7 – 2.883,1 Kcal/Kg) em comparação com a lenha, valor 7,12 – 10,47 MJ/kg (1.700,0 – 2.500,0 kcal/kg), os números são expressivamente superiores, bem como os avaliados por Biomachine (2006) e Stolf (2013, *apud* VIEIRA, 2014), acima da eficiência.

Gráfico 5 - Média do Poder Calorífico Inferior em MJ/kg



Fonte: Da Autora, 2015.

4.6 ESCALA DE RINGELMANN

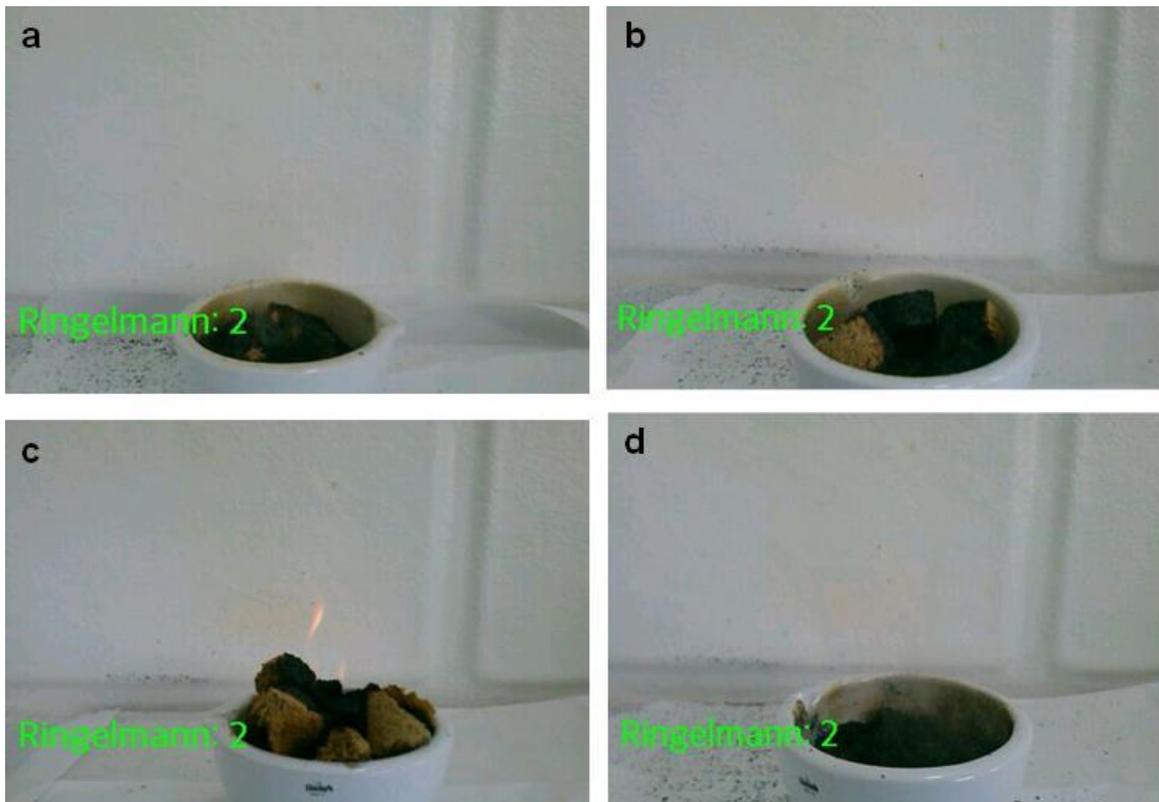
Neste trabalho foi utilizado o aplicativo chamado SMOKESHOT, liberado pela Actsistemas, para mensurar o índice da emissão de fumaça preta através da tecnologia computacional. A tecnologia consiste na metodologia da Escala de Ringelmann, usada mundialmente para medir a emissão da fumaça preta de motores a diesel e de chaminés industriais. É feita a medição e transferência dos dados realizados por software.

Deste modo, foi testada esta tecnologia para verificar a cor da fumaça liberada durante o processo de combustão do material desenvolvido. A Figura 7 apresenta as imagens capturadas dos corpos de prova durante a queima, as quais foram correlacionadas com a escala de Ringelmann.

Pode ser observado, através da Figura 7, que a fumaça durante a queima não foi preta, e todos os corpos de prova apresentam o valor 2 na escala de Ringelmann, que equivale a 40% de densidade da fumaça.

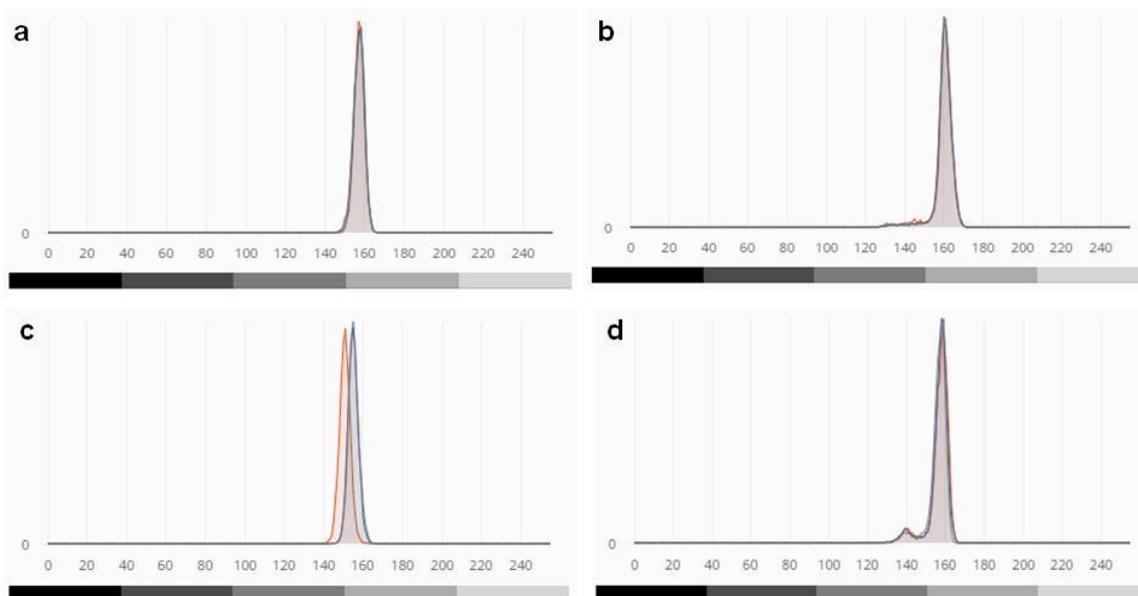
No Gráfico 6 pode ser verificado que os maiores picos encontram-se no eixo x na escala de cor cinza - 140 a 170; ou seja, estão no nível 2, cor cinza claro.

Figura 8 – Foto da fumaça dos corpos de prova durante a queima; (a) casca de arroz e amido; (b) casca de arroz, amido e ácido acético; (c) casca de arroz, amido com glicerol; (d) casca de arroz, amido, glicerol e ácido acético



Fonte: Da autora, baseado no aplicativo SMOKESHOT, 2015.

Gráfico 6 - Escala de Ringelmann da fumaça dos corpos de prova; (a) casca de arroz e amido; (b) casca de arroz, amido e ácido acético; (c) casca de arroz, amido e glicerol; (d) casca de arroz, amido, glicerol e ácido acético



Fonte: Da autora, baseado no aplicativo SMOKESHOT, 2015.

No Gráfico 7 podem ser verificados os valores dos níveis de densidade da fumaça medidos pela Escala de Ringelmann, que foram de 38 e 39%. Não foi observada variação importante para nenhuma das composições preparadas.

Gráfico 7 - Nível de densidade da Escala de Ringelmann da fumaça dos corpos de prova; (a) casca de arroz e amido; (b) casca de arroz, amido e ácido acético; (c) casca de arroz, amido e glicerol; (d) casca de arroz, amido e glicerol e ácido acético



Fonte: Adaptado pela autora, baseado no aplicativo SMOKESHOT, 2015.

O uso da casca de arroz reduz o descarte inadequado no meio ambiente, evitando a degradação da paisagem e o acúmulo de resíduos no agroecossistema.

Em relação à combustão dos combustíveis sólidos produzidos, a escolha do amido como aglutinante é ambientalmente viável, pois ele está no grupo dos aglutinantes considerados não emissores de fuligem durante sua queima, segundo Antunes (1982).

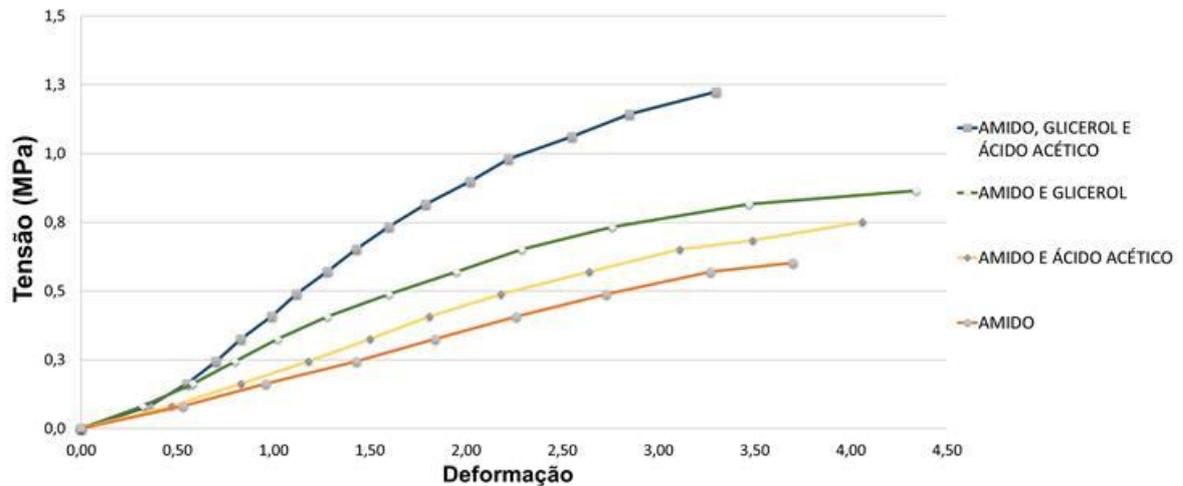
4.7 ENSAIO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

O ensaio de resistência mecânica consiste em submeter corpos de prova cilíndricos a cargas de compressão, onde a tensão de compressão produz uma tensão de tração paralela.

Analisando as curvas tensão/deformação do Gráfico 8 para o ensaio mecânica de compressão para os corpo de prova de casca de arroz, amido, glicerol e ácido acético; casca de arroz e glicerol; casca de arroz, amido, ácido acético; e

casca de arroz e amido, observa-se a alteração do comportamento com a crescente perfis da tensão mecânica.

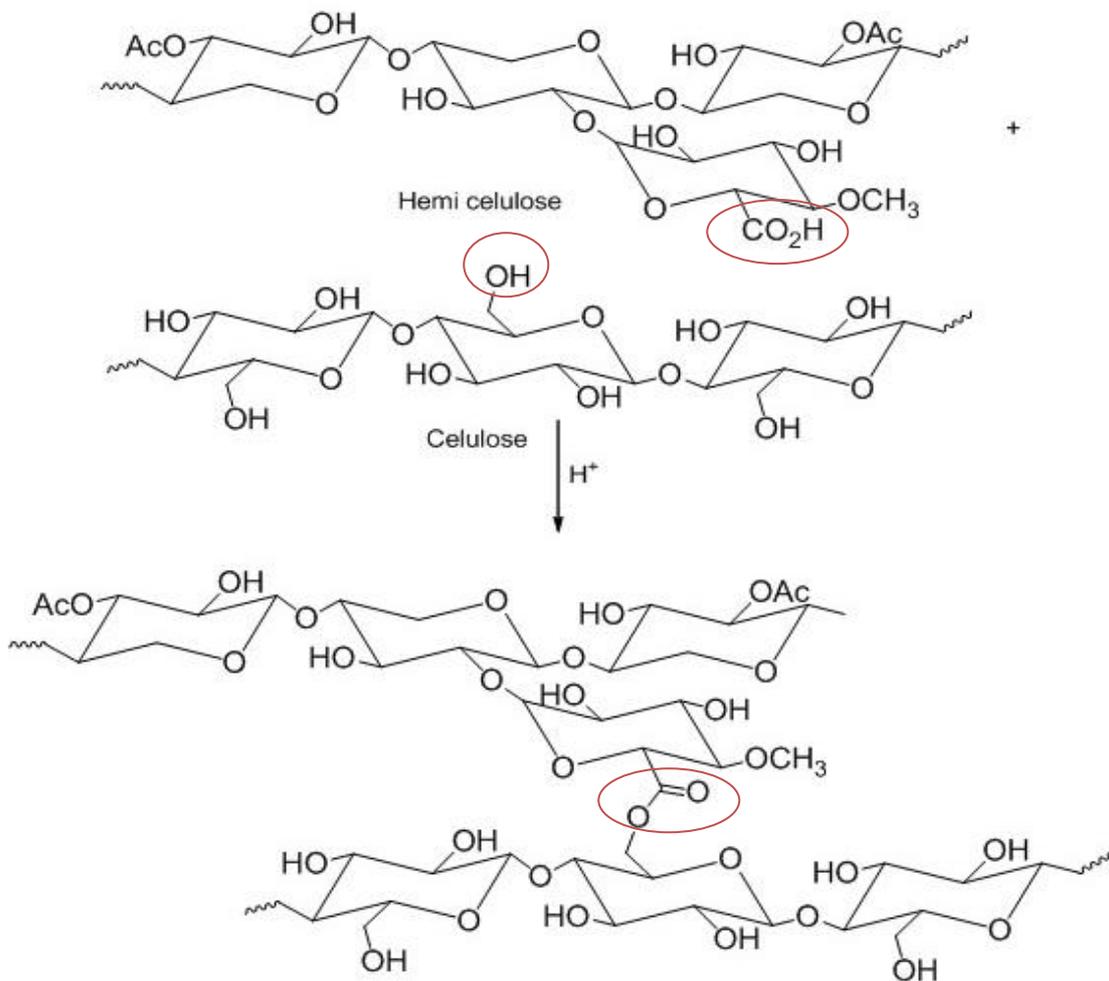
Gráfico 8 - Tensão mecânica de compressão e deformação suportada por corpo de prova de casca de arroz, amido, glicerol e ácido acético; casca de arroz e glicerol; casca de arroz, amido, amido, ácido acético; e casca de arroz e amido.



No Gráfico 8 percebe-se que os blocos ensaiados apresentam um comportamento elástico e plástico. Para todos os blocos foi observado um comportamento típico de materiais poliméricos corroborando o relatado de Luz; Gonçalves; Del'Arco. Jr., 2006, que observou que poder aglutinante da celulose e hemicelulose é decorrente da formação de homopolímero linear.

O bloco casca de arroz, amido e ácido acético o comportamento mecânico foi semelhante, o ácido acético foi adicionado para favorecer as ligações entre celulose e hemicelulose, presentes na casca de arroz e no amido. Nesta composição, o ácido acético age como catalisador entre as moléculas de celulose e hemicelulose, conforme demonstrado na Figura 9, favorecendo a formação de ligações ésteres, as quais justificam a maior resistência mecânica desta composição, quando comparada à casca de arroz e amido.

Figura 9 – Reação química de esterificação entre a celulose e a hemicelulose, catalisada por ácido



Fonte: Da autora, 2015.

A Figura 9 representa a reação química de esterificação entre a celulose e a hemicelulose, catalisada por ácido, sendo que também é possível a reação de esterificação entre duas moléculas de hemicelulose.

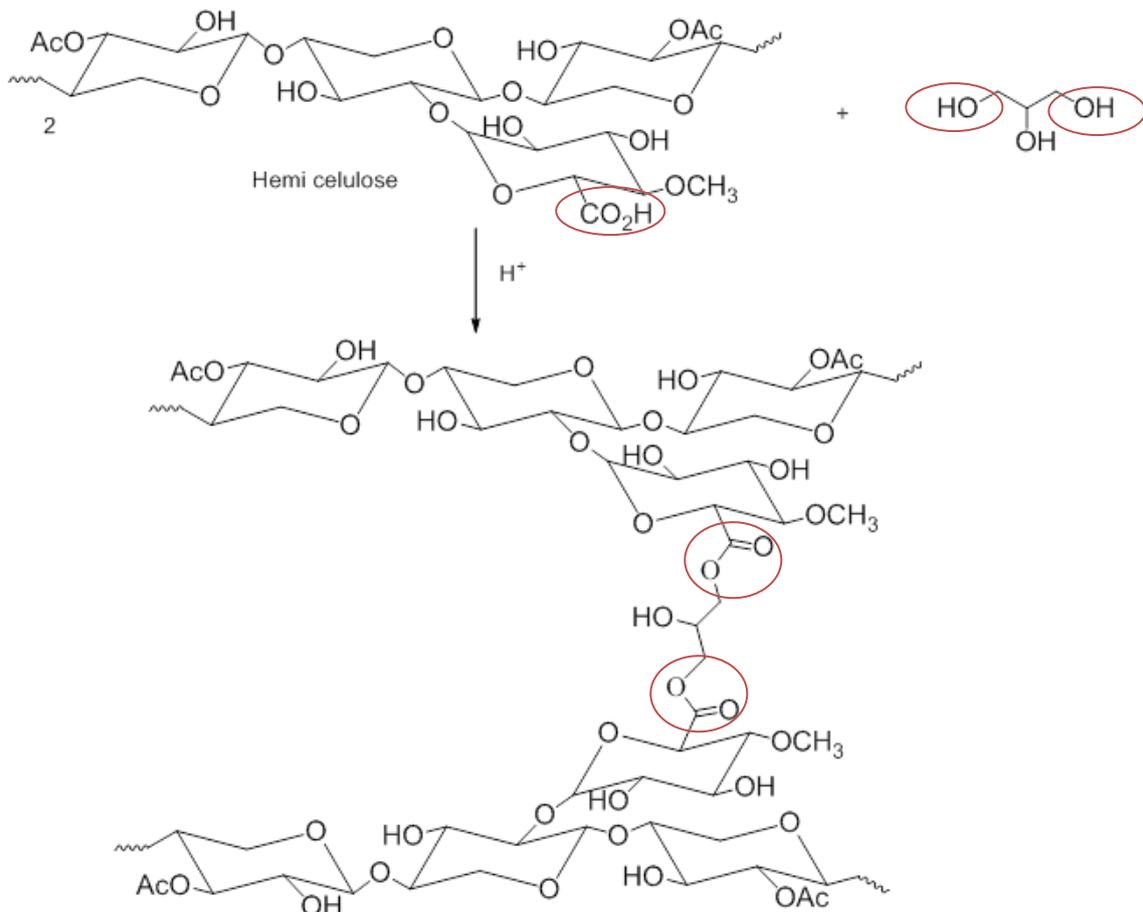
Para a composição casca de arroz, amido e glicerol, o glicerol é provável responsável pela maior resistência mecânica apresentada nos blocos desta composição. O glicerol possui três grupos OH, que podem fazer ligações de hidrogênio com diferentes grupos OH, tanto da celulose e como da hemicelulose. A ligação de hidrogênio é considerada fraca quando comparada a uma ligação forte, do tipo ligação polar C-O nos ésteres; mas, devido ao grande número de ligações de hidrogênio, pode justificar a resistência mecânica do material. Deste modo, a composição casca de arroz, amido e glicerol apresenta maior resistência mecânica

que as composições casca de arroz e amido e casca de arroz, amido e ácido acético.

Para a composição casca de arroz, amido, glicerol e ácido acético foram observada que o ácido acético age como catalisador entre as moléculas de celulose e hemicelulose, e hemicelulose e glicerol, levando à formação de ligações fortes entre as moléculas, do tipo ligação polar C-O (Figura 10). Bem como o glicerol, celulose e hemicelulose também formar ligações de hidrogênio entre as moléculas. As ligações intermoleculares são responsáveis pelo aumento da tensão máxima observada nestes blocos, conforme Gráfico 8.

Na Figura 10 está representada a formação de ligações ésteres, as quais justificam a maior resistência mecânica desta composição.

Figura 10 – Reação química de esterificação entre a celulose e a hemicelulose e glicerol catalisada por ácido



Fonte: Da autora, 2015.

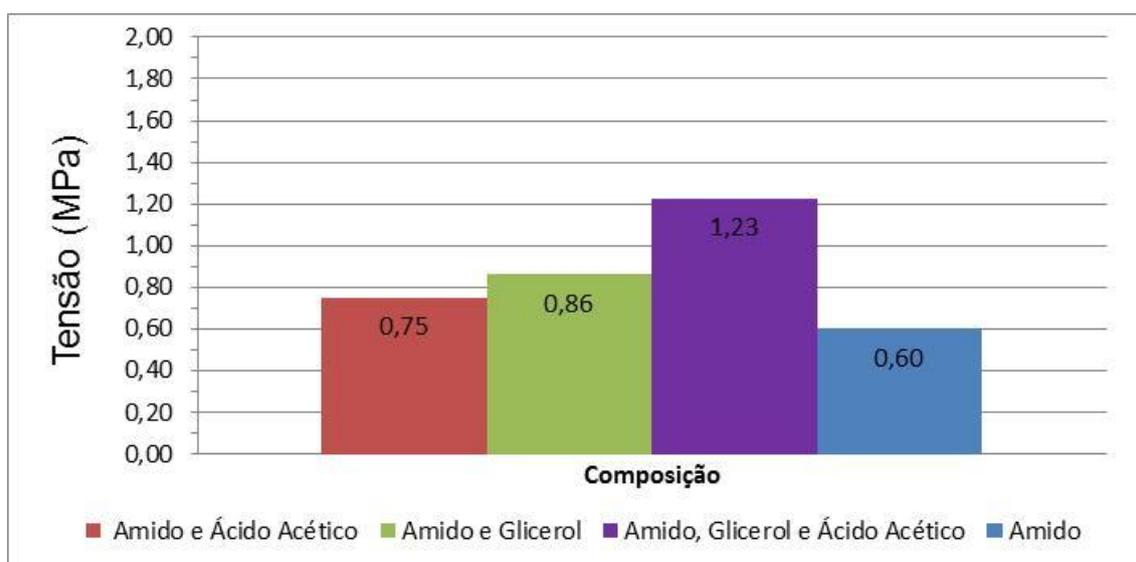
Isso significa que os valores apresentados no Gráfico 8 estão relacionados com a resistência máxima à compressão que os corpos de prova

podem suportar. Este valor pode auxiliar no armazenamento e transporte do material. Os dados deste trabalho são expressos em MPa, ou seja, a tensão máxima que o corpo de prova resistiu até fratura, considerando as dimensões da amostra na hora do ensaio.

Segundo Oliveira (2013), este ensaio visa a analisar o comportamento mecânico dos briquetes, quando submetidos à determinada carga ou esforço. É principalmente correlacionado à carga que os briquetes sofrem quando empilhados no processo de estocagem.

No Gráfico 9 podem ser observados os valores de tensão máxima suportada pelos corpos de prova obtidos em Megapascal (MPa).

Gráfico 9 - Resistência mecânica suportada por corpo de prova de casca de arroz, amido e ácido acético; casca de arroz, amido e glicerol; casca de arroz, amido, glicerol, ácido acético; e casca de arroz e amido



Fonte: Da autora, 2015.

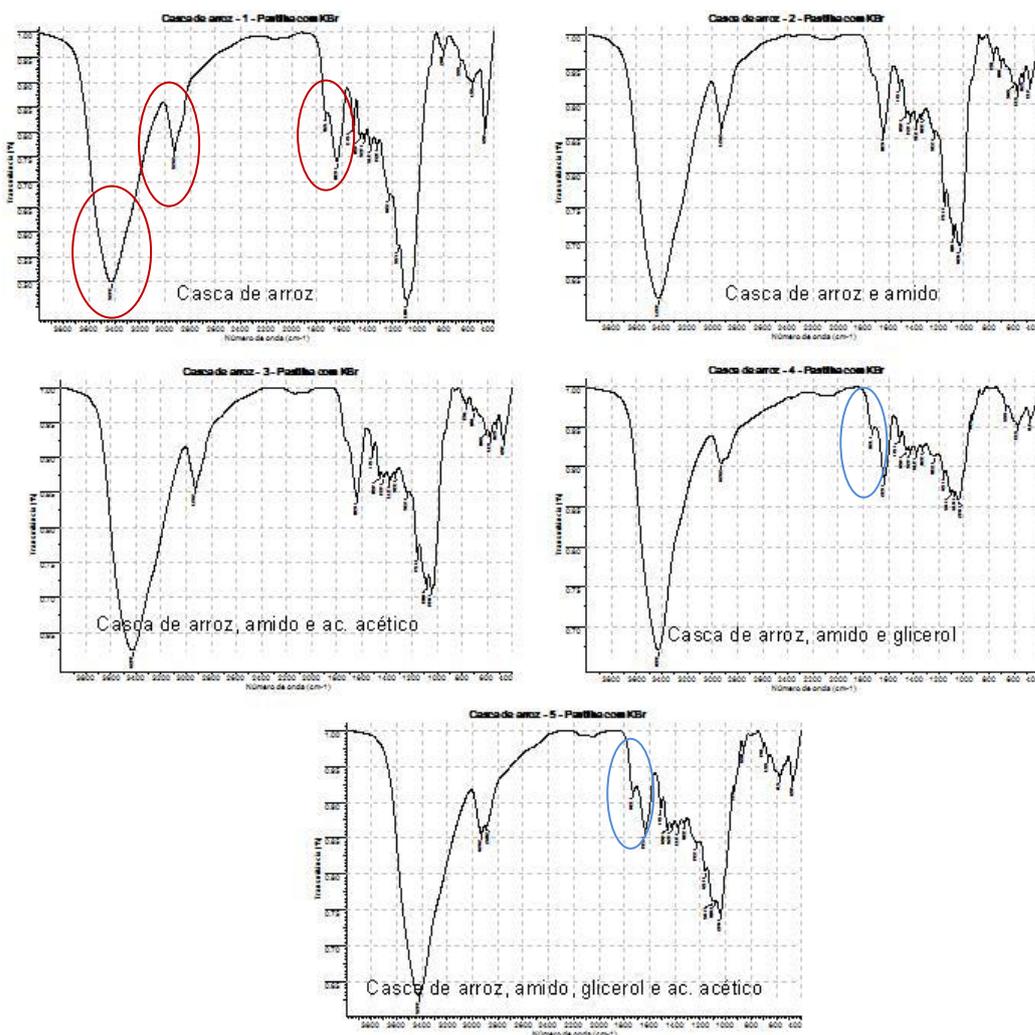
De acordo com o Gráfico 9, os corpos de prova sofreram diferença em resistência à compressão diametral dependente dos constituintes. Para a composição de casca de arroz, amido e ácido acético, o valor foi de 0,75 MPa; para a composição de casca de arroz, amido e glicerol, o valor foi de 0,86 MPa; para composição de casca de arroz, amido, glicerol e ácido acético, foi encontrado o valor de 1,23 MPa; e para a composição de casca de arroz e amido, de 0,6 MPa. Os corpos de prova ficaram mais resistentes conforme a adição de amido, glicerol e ácido acético, e isto se deve ao poder de adesão destes materiais. A resistência

mecânica pode ser justificada pelo tipo de ligação química que acontece entre os constituintes.

4.8 ANÁLISE DE INFRAVERMELHO

Na Figura 11 apresentam-se as análises de infravermelho para casca de arroz e para as quatro composições dos combustíveis sólidos preparados.

Figura 11 – Espectros de IV de casca de arroz e das quatro composições do combustível sólido



Fonte: UFSC, 2015.

Na Figura 11 pode ser observada, para todos os IV, banda forte de região de estiramento axial, 3425 cm^{-1} . Esta banda indica a presença do grupo OH, existente na celulose, hemicelulose e glicerol. Bandas em torno de 2929 cm^{-1} e 2892 cm^{-1} aparecem também em todos os espectros da Figura 10, pois são decorrentes

da presença do estiramento C-C e C-H, respectivamente. A região de estiramento da carbonila é 1850–1650 cm^{-1} , onde se observa um estiramento em 1638 cm^{-1} , com pequenas variações para todas as amostras. Para os IV 4 e 5, também é visível um estiramento próximo a 1730 cm^{-1} , podendo ser atribuído à nova ligação éster formada conforme reações apresentadas no esquema 7 e 8.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os resultados deste estudo experimental e com a metodologia adotada, foi possível chegar às conclusões que seguem.

A casca de arroz demandou a utilização de misturas, água e temperatura, de forma que a adição destes materiais foi imprescindível para a unificação das partículas e a obtenção dos combustíveis sólidos.

A matéria-prima e as misturas apresentaram massa específica e umidade relativamente baixas. No entanto, mostram-se adequadas para a produção de biocombustíveis sólidos.

A prensa utilizada inicialmente demonstrou-se não eficiente, pois não promoveu o formato esperado.

Tanto o amido quanto o glicerol e o ácido acético demonstraram-se eficazes como agentes ligantes. Entretanto, o ácido acético somente com o amido demonstrou ser ineficiente, pois aumentou o valor de teor de cinzas, fazendo o poder calorífico fosse menor. Logo, os corpos de prova com a composição de amido, amido e glicerol, amido e glicerol e ácido acético foram similares a briquetes de outras biomassas de diversas literaturas.

É interessante dar maior atenção ao tipo de aglomerante, devido à proporção utilizada, que pode repercutir no aumento do custo do combustível sólido em escala industrial. Os corpos de prova que apresentaram o maior teor de umidade total foram os compostos por amido com glicerol e amido com glicerol e ácido acético. Porém, ainda inferiores à umidade da lenha (25,0 –30,0%).

As amostras com ácido acético denotaram altos teores de cinzas. Entretanto, todas as amostras produzidas com o amido também concentraram energia disponível em termos de volume, ou seja, nas amostras com o amido e glicerol, o maior PCI foi de 3.122,9 kcal/kg.

Em relação à resistência máxima à compressão, os corpos de prova foram capazes de suportar 1,23 MPa para a composição casca de arroz, amido, glicerol e ácido acético: esta mistura teve mais poder adesão. Foi encontrada formação de ligações fortes entre as moléculas, ligações ésteres, as quais justificam a maior resistência mecânica desta composição. A composição dos combustíveis sólidos foi caracterizada por infravermelho.

Para as propriedades físico-químicas das amostras, pode-se concluir que os combustíveis sólidos produzidos com os dois tipos de ligantes, amido e glicerol, bem como com os ligantes amido com glicerol e ácido acético contribuem para geração de energia e aproveitamento de resíduos.

Os produtos finais, os combustíveis sólidos, atenderam as funções esperadas neste estudo, podendo desempenhar satisfatoriamente a substituição das fontes caloríficas tradicionais, comparando-se, inclusive, aos tradicionais briquetes de carvão vegetal e lenha.

Portanto, os resultados deste trabalho sinalizaram a viabilidade técnica de biocombustíveis sólidos a partir da casca de arroz com ligantes de origem vegetal como uma solução para o aproveitamento dos resíduos lignocelulósicos. Do ponto de vista ambiental, a principal vantagem é a substituição de fontes não renováveis de energia por uma matéria-prima sustentável e de baixo custo. Como sugestão, pode-se realizar novamente o experimento e avaliar as emissões atmosféricas resultantes da combustão, bem como a composição das cinzas. Sugerem-se, também, estudos mais aprofundados, visando a conhecer em maior detalhe o processo de fabricação de combustível sólido com resíduos de casca de arroz no seu estado natural, possibilitando, assim, o aproveitamento de um maior volume e variedades de misturas.

Pesquisas futuras devem ser feitas na tentativa de otimizar o tempo de secagem, assim como estudar a viabilidade econômica para possível produção em escala industrial. Avaliar combustíveis sólidos e briquetes produzidos a partir de misturas dos resíduos da folha, caule e casca de arroz e também papel, apresenta-se como tema interessante para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil 2002**. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/01-Introducao\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/01-Introducao(3).pdf)> . Acesso em: 25 mar. 2015

_____. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil 2005**. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa(2).pdf)>. Acesso em: 28 mar. 2015

_____. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil 2005**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2015

ARRUDA. **Análise de combustíveis de caldeiras**. Disponível em: <<http://usuarios.upf.br/~engeamb/TCCs/2009-2/MATEUS%20ZART%20DE%20ARRUDA.pdf>>. Acesso em: 22 mar. 2015.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L.E. G. Usos diretos e propriedades da madeira para geração de energia. IPEF, São Paulo, Circular Técnica, n. 52, PBP/3.1.8, 7p. jun. 1979. Disponível em: <<http://ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr052.pdf>> . Acessado em: 22 mar. 2015.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA (CENBIO). **Atlas de bionergia do Brasil**. USP. São Paulo. 2002. Disponível em: <http://cenbio.iee.usp.br/download/atlas_cenbio.pdf>. Acesso em: 02 jan. 2015.

_____. **Banco de dados de Biomassa do Brasil**. Disponível em: <http://infoener.iee.usp.br/scripts/biomassa/br_briquete.asp>. Acesso em: 13 mar. 2015.

_____. **Biomassa**. USP. São Paulo. 2009. Disponível em: <<http://cenbio.iee.usp.br/saibamais/conceituando.htm>>. Acesso em: 02 jan. 2015.

_____. **Biomassa**. USP. São Paulo. Disponível em: <<http://infoener.iee.usp.br/cenbio/biomassa.htm>>. Acesso em: 20 maio 2015.

CHANG, R. **Química Geral**. [S.l]: Books, 2015. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=1wlkVRWPzAC&pg=PA169&dq=energia+%C3%A9rmica&hl=ptBR&sa=X&ei=7S3GVPD_F4ergwTut4LQCA&ved=0CDIQ6AEwAw#v=onepage&q=energia%20t%C3%A9rmica&f=false.>> Acesso em: 26 jan. 2015.

Chang, Raymond. Química geral: conceitos essenciais. Editora McGraw-Hill. São Paulo, 2006.

CHAVES, A. M. B.; VALE, A. T.; MELIDO, R. C. N.; ZOCH, V. P. **Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de eucalyptus spp**. ENCICLOPÉDIA BIOSFERA, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.9, n.17; 533-542. p 536.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). **Prospecção de preços mínimos para safra 2013/2014**. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_11_22_15_41_10_pm_vera_o_13_14.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2015.

CORTEZ, L. A., LORA E. S., ALYARZA, J. A. C. **Biomassa para energia**. Editora Unicamp, 2008.

COTRAN. Dispõe sobre a circulação e fiscalização de veículos automotores diesel. Resolução nº 510/77. Disponível em: http://www.denatran.gov.br/publicacoes/download/ctb_e_legislacao_complementar.pdf>. Acesso em: 01 jun 2015.

COUTO, C. M. **Estimativa do poder calorífico de madeiras de acácia-negra e eucalipto do Município de Pelotas – RS**. Dissertação de graduação. Pelotas, 2014. Universidade federal de pelotas centro de engenharias.

ECKERT, C. T.; FRIGO, E. P.; BASTOS, R. K.; MARI Jr, A.; MARI, A. G.; CABRAL, A. C. Biomassa Residual Vegetal. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 4, p. 32-44, 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/952626/1/DOC13.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2014.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Normas e especificações técnicas para análises de briquetes e péletes**. 2012b. Disponível em: <http://www.diadecampo.com.br/zpublisher/materias/Materia.asp?id=28322&secao=Artigos%20Especiais>>. Acesso em: 12 dez. 2014.

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO. **Boletim Técnico da Faculdade de Tecnologia de São Paulo**, 2012. Disponível em: <http://bt.fatecsp.br/system/articles/950/original/bt34.pdf> > Acesso em: 29 abr. 2015.

FILIPPETO, D. **Briquetagem de resíduos vegetais: viabilidade técnico-econômica e potencial de mercado**. Dissertação de Mestrado (Faculdade de Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas. Campinas. SP. 2008.

GARCIA, R. Combustíveis e combustão industrial. Editora Interciência. Rio de Janeiro, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Levantamento Sistemático de Produção Agrícola**, 2014. Disponível em: [ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_\[mensal\]/Comentarios/lspa_201503comentarios.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_[mensal]/Comentarios/lspa_201503comentarios.pdf)>. Acesso em: 30 maio 2015.

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA SUL RIO GRANDENSE. **Fundamentos de Ecologia e Tecnologia de Tratamento de Resíduos**, 2013. Disponível em:

<http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifsul/tecnico_biocombustivel/fundamentos_ecologia_tecnologia_tratamento_residuos.pdf> . Acesso em: 02 jun. 2015.

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). Diagnóstico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvopastoril e Agroindústrias Associadas, 2012.

http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120917_relatorio_residuos_organicos.pdf>. Acessado em: 03 abr. 2015.

JARA, E. R. P. O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1989. 6 p. (Comunicação Técnica, 1997).

LACERDA, C. V.; SOUZA, R. O. L.; ESSAYEM, N.; GONZALEZ, W. A. Reaproveitamento do Glicerol Residual do Processo de Produção de Biodiesel Utilizando Catalisador à Base de HPA Suportado em Ácido Nióbio para a Obtenção de Aditivos. **Rev. Virtual Quim**, volume. 6, n. 5, pp. 1332-1352, 2014. Disponível em: <<http://www.uff.br/rvq>>. Acesso em: 05 maio 2015.

LEMOS, C. F.; GOMES, J. J. **Glossário de Meio Ambiente**. Editora Clube de Autores, 2008. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=DpZMBQAAQBAJ>>. Acesso em: 06 jun. 2015.

LUZ, S.; GONÇALVES, A. R.; DEL'ARCO Jr., A. P. Microestrutura e propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno reforçado com celulose de bagaço e palha de cana. **Revista Matéria**, 2006, 11(2), 101-110. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1517-70762006000200004>>. Acesso em: 26 mar. 2015.

MAITI, S.; DEY, S.; PURAKAYASTHA, S.; GHOSH, B. Physical and thermochemical characterization of rice husk char as a potential biomass energy source. **Bioresource Technology**. Volume 97, pp. 2065–2070, 2006

MARTINI, P. R. R. Conversão Piro-lítica de Bagaço Residual da Indústria de Suco de Laranja e Caracterização Química dos Produtos. 2009. Dissertação (mestrado em química) PPGQ, UFSM, Santa Maria: 2009.

MÁXIMO, A.; ALVARENGA, B. **Física, volume único**: curso completo. 1. ed. São Paulo: Scipione, 2000.

MORAIS, D.M. **Briquetes de resíduos ligno-celulósicos como potencial energético para queima de blocos cerâmicos**: uma aplicação em uma indústria de cerâmica vermelha que abastece o Distrito Federal. Tese de Doutorado (Estruturas e Construção Civil). Universidade de Brasília. Brasília. 2007.

MORAIS, M. R.; SEYE, O.; FREITAS, K. T.; RODRIGUES, M.; SANTOS, E. S. S.; SOUZA, R. C. **Obtenção de briquetes de carvão vegetal de cascas de arroz utilizando baixa pressão de compactação**. 2006. Artigo. Manaus AM. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022006000200019&script=sci_arttext>. Acesso em: 07 abr. 2014.

NOGUEIRA, G. **Combustão e gasificação de biomassa sólida**. Brasília. Ministério de Minas e Energia. 2008.

OLIVEIRA, R. Z. L. **Moldagem de briquetes com finos de carvão vegetal aglutinados com parafina**: Caracterização de algumas propriedades. Dissertação de Mestrado (Ciências dos Materiais). Sorocaba SP. 2013. Disponível em: <http://www.btdtd.ufscar.br/htdocs/tedeSimplificado//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=6776>. Acesso em: 31 mar. 2015.

OSAKI, F.; DAROLT, M. R. estudo da qualidade de cinzas vegetais para uso como adubos na região metropolitana de Curitiba. Revista Setor Ciências Agrárias, v. 2. 1991.

PAULA, L. E. R. **Características químicas de resíduos de resíduos lignocelulósicos visando à produção de energia**. Anais. Encontro brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira. 2010.

PORTAL BRASIL. Brasil é destaque global no uso de biomassa, 2011. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2011/12/brasil-e-destaque-global-no-uso-de-biomassa>>. Acesso em: 25 maio 2015.

QUIRINO, W. F. **Características de briquetes de carvão vegetal a seu comportamento na combustão**. 1991. 80 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, SP.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. **Revista da Madeira**, Curitiba, n. 89, p. 100-106, 2005.

RAMBO, M. **Aproveitamento da casca de arroz para produção de xilitol e sílica xerogel**. 2009. Dissertação (Mestrado em Química). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2009. Disponível em: <http://cascavel.ufsm.br/tede/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=2920>. Acesso em: 01 nov. 2014.

RICHARDSON, R. J. **Pesquisa social**: métodos e técnicas. São Paulo: Atlas, 1999.

RODRIGUES, V. A. J.; **Valorização energética de lodo biológico da indústria de polpa celulósica através da briquetagem**. 2010. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/9006/dissertacao_Val%C3%A9ria%20Ant%C3%B4nia%20Justino%20Rodrigues.pdf?sequence=1>. Acesso em: 14 out. 2014.

SANTOS, F. **Glossário Unicamp**, 2012. Disponível em: <<http://www2.ib.unicamp.br/profs/fsantos/refer/Glossario.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2014.

SANTOS, J. R. S. **Estudo da biomassa torrada de resíduos florestais de eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos**. 2012. Dissertação (Mestrado em ciências, programa: recursos florestais – USP). Piracicaba. 2012.

SILVA, C. A. **Estudo técnico-econômico da compactação de resíduos madeireiros para fins energéticos**. 2007. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

SILVA, M.G.; SOUZA, F. L.; SILVA, V. G. Reciclagem de cinzas de cascas de eucalipto e entulho de obra em componentes de construção. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1., 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Antac, 1996. P.102-108.

SILVERSTEIN, R. M.; BASSLER, G. C.; MORRIL, T. C.; **Identificação Espectrométrica de Compostos Orgânicos**, 5ª ed., Rio de Janeiro: LTC, 1994.

SMOKESHOT. **Sistema para fiscalizar o índice da emissão de fumaça preta**. 2015. Disponível em: <<http://smokeshot.com.br/>>. Acesso em: 01 maio 2015

SOCIEDADE BRASILEIRA PARA O PROGRESSO DA CIÊNCIA. **Alterações nas propriedades coligativas da adição de glicerina em solução com água aplicada como fluido térmico**, 2009. Disponível em: <<http://www.sbpnet.org.br/livro/62ra/resumos/resumos/1163.htm>>. Acesso em: 20 maio 2015.

SAWIN, J. L.; BHATTACHARYA, S. C.; Galán, E. M.; McCURONE, A.; MOOMAW, W. R.; Sonntag-O'Brien, V.; Sverrisson, F.; CHAWLA, K.; MUSOLINO, E.; SKEEN, J.; MARTINOT, E. **Renewables 2012 Global Status Report**. Paris: REN21, 2012. Disponível em: <http://www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/GSR2012_low%20res_FINAL.pdf>. Acesso em: 25 maio 2015.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas**, Dissertação de Mestrado em Energia na Agricultura. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. 2012. Disponível em: <http://200.201.88.199/portaispos/media/File/energia_agricultura/pdf/Dissertacao_Ana_C_Vieira.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2015.

VIEIRA, N. A. D. **Obtenção de briquetes a partir da casca do arroz e avaliação do seu potencial energético**. Monografia de Graduação. Centro Universitário Univates, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Curso de Engenharia Ambiental, 2014. Disponível em: <file:///F:/Desktop%2004_12/Documents/2014NailceAparecidaDornelesVieira.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2015.

YUNUS; A. Ç.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos**. 3.ed. McGraw Hill Brasil, 2015. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=aP3OBgAAQBAJ&pg=PA39&dq=densidade+massa+e+volume&hl=pt->

BR&sa=X&ved=0CB0Q6AEwAGoVChMIgra8zvSPxglVExqMCh2MNgAn#v=onepage
&q=densidade&f=false>. Acesso em: 14 jun. 2015.

ANEXOS

ANEXO A – Granulometria

Peneirou-se o material até que os grãos mais finos passassem quase que totalmente pelas malhas da tela. A ocorrência se deu em um intervalo entre 3 min a 5 min. Em seguida, continuou o peneiramento com suaves movimentos de vaivém horizontais. A figura 11 mostra as peneiras utilizadas no procedimento.

Figura 11 - Peneira com Granulometria utilizadas no procedimento



Fonte: Autora, 2015.

Completado essa etapa, limpou-se a tela da peneira com auxílio de um pincel médio, foi recolhido todo o material e transferido para o fundo. Após, juntou-se todo o material do fundo (passante) e foram recolhidos todos os grãos contidos com auxílio do pincel pequeno, e passados para um recipiente. Finalizou-se este processo com a pesagem em precisão de 0,01 g.

ANEXO B – Equipamento Utilizado para Resistência Mecânica

Figura 12 - Máquina para ensaio mecânico



Fonte: Autora, 2015.

ANEXO C – Metodologia para determinação da massa específica, densidade, volume, teor de umidade

Após confeccionado, o corpo de prova foi seco em estufa para fazer as primeiras análises. Na figura 13 mostra a Estufa utilizada.

Figura 13 - Estufa



Fonte: Autora, 2015.

Após a determinação da massa seca, foi necessária a obtenção da massa, volume, área.

A partir destes dados foi possível calcular os valores de massa específica.

ANEXO D – Corpos de prova após secagem em estufa

Figura 14 - Corpo de prova a partir do amido



Fonte: Autora, 2015.

Figura 15 - Corpo de prova a partir do amido e ácido acético



Fonte: Autora, 2015.

Figura 16 - Corpo de prova a partir do amido e glicerol



Fonte: Autora, 2015.

Figura 17 - Corpo de prova a partir do amido, ácido acético e glicerol



Fonte: Autora, 2015.

ANEXO E – Equipamento utilizado como medidor de Teor de Cinzas

A mufla foi utilizada para obtenção do teor de cinzas.

Figura 18 - Mufla



Fonte: Autora, 2015.

ANEXO F – Chapa de aquecimento

A chapa de aquecimento foi utilizada para a preparação da mistura para posterior obtenção do corpo de prova.

Figura 19 - Chapa de aquecimento



Fonte: Autora, 2015.

6 ANEXO G – Chapa de aquecimento Fluxograma representando a metodologia utilizada no trabalho



Fonte: Da autora, 2015.