

**PRODUÇÃO DE BRIQUETES
A PARTIR DE BIOMASSA FLORESTAL
AGREGANDO RESÍDUOS PLÁSTICOS
PARA COMBUSTÃO**

MAELE COSTA DOS SANTOS
SÉRGIO METH MORGENBESSER
TÂNIA REGINA DE SOUZA
ALEXANDRE DENES ARRUDA
THAMIRIS RENATA MARTINY
FERNANDA RODRIGUES DA COSTA
FABIANO DA SILVA LOPES
MAURICIO HENRIQUE NOVAIS FURTADO
ELIZANDRA MARTINS CUPERTINO
CIBELE MENSCH CANABARRO
ANDERSON CAGLIARI



MAELE COSTA DOS SANTOS
SÉRGIO METH MORGENBESSER
TÂNIA REGINA DE SOUZA
ALEXANDRE DENES ARRUDA
THAMIRIS RENATA MARTINY
FERNANDA RODRIGUES DA COSTA
FABIANO DA SILVA LOPES
MAURICIO HENRIQUE NOVAIS FURTADO
ELIZANDRA MARTINS CUPERTINO
CIBELE MENSCH CANABARRO
ANDERSON CAGLIARI

**PRODUÇÃO DE BRIQUETES A PARTIR DE BIOMASSA FLORESTAL
AGREGANDO RESÍDUOS PLÁSTICOS PARA COMBUSTÃO**

Belém-PA

Home Editora

2023

© 2023 Edição brasileira
by Home Editora
© 2023 Texto
by Autor
Todos os direitos reservados

Home Editora
CNPJ: 39.242.488/0002-80
www.homeeditora.com
contato@homeeditora.com
9198473-5110
Av. Augusto Montenegro, 4120 - Parque Verde, Belém - PA, 66635-110

Editor-Chefe

Prof. Dr. Ednilson Ramalho

Revisão, diagramação e capa

Autor

Produtor editorial

Laiane Borges

**Catálogo na publicação
Home Editora**



P964

Produção de briquetes a partir de biomassa florestal agregando resíduos plásticos para combustão / Maele Costa dos Santos *et al.* – Belém: Home, 2023.

Outros autores

Sérgio Meth Morgenbesser
Tânia Regina de Souza
Alexandre Denes Arruda
Thamiris Renata Martiny
Fernanda Rodrigues da Costa
Fabiano da Silva Lopes
Mauricio Henrique Novais Furtado
Elizandra Martins Cupertino
Cibele Mensch Canabarro
Anderson Cagliari

Livro em PDF

60 p., il.

ISBN: 978-65-84897-43-4
DOI: 10.46898/home.3193a6ba-7729-4e17-afd6-
ad4bfd6c0d5c

1. Produção de briquetes a partir de biomassa florestal agregando resíduos plásticos para combustão. I. Santos, Maele Costa dos *et al.*
II. Título.

CDD 550

Índice para catálogo sistemático

I. Ciências Agrárias.



Todo o conteúdo apresentado neste livro é de responsabilidade do(s) autor(es).

Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição-SemDerivações 4.0 Internacional.

Conselho Editorial

Prof. Dr. Ednilson Sergio Ramalho de Souza - UFOPA
(Editor-Chefe)

Prof. Dr. Laecio Nobre de Macedo-UFMA

Prof^a. Ma. Rayssa Feitoza Felix dos Santos-UFPE

Prof. Me. Otávio Augusto de Moraes-UEMA

Prof. Dr. Aldrin Vianna de Santana-UNIFAP

Prof^a. Ma. Luzia Almeida Couto-IFMT

Prof. Me. Luiz Francisco de Paula Ipolito-IFMT

Prof. Me. Fernando Vieira da Cruz-Unicamp

Prof. Dr. Carlos Erick Brito de Sousa-UFMA

Prof^a. Dra. Renata Cristina Lopes Andrade-FURG

Prof. Dr. Clézio dos Santos-UFRRJ

Prof. Dr. Rodrigo Luiz Fabri-UFJF

Prof. Dr. Manoel dos Santos Costa-IEMA

Prof^a. Ma. Adriana Barni Truccolo-UERGS

Prof. Me. Alisson Junior dos Santos-UEMG

Prof. Me. Raphael Almeida Silva Soares-UNIVERSO-SG

Prof. Dr. Rodolfo Maduro Almeida-UFOPA

Prof. Me. Tiago Silvio Dedonê-Facrei

Prof. Dr. José Moraes Souto Filho-FIS

Prof. Me. Fernando Francisco Pereira-UEM

Prof. Dr. Deivid Alex dos Santos-UEL

Prof. Me. Antonio Santana Sobrinho-IFCE

Prof^a. Dra. Maria de Fatima Vilhena da Silva-UFPA

Prof^a. Dra. Dayse Marinho Martins-IEMA

Prof. Me. Darlan Tavares dos Santos-UFRJ

Prof. Dr. Daniel Tarciso Martins Pereira-UFAM

Prof^a. Dra. Elane da Silva Barbosa-UERN

“Acreditamos que um mundo melhor se faz com a difusão do conhecimento científico”.

Equipe Home Editora

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	6
CAPÍTULO I.....	7
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	7
1.1 Biomassa	8
1.2 Biomassa florestal como fonte de energia	9
1.2.1 Resíduo de beneficiamento da madeira: serragem	10
1.3 Resíduos plásticos e reaproveitamento	11
1.3.1 Poder calorífico dos plásticos.....	11
1.4 Briquetes	14
1.4.1 Processo de briquetagem.....	16
1.4.2 Processos de compactação	18
1.5 Combustível e combustão	19
1.6 Carvão vegetal	20
1.7 Poder calorífico superior e inferior.....	21
CAPÍTULO II	23
METODOLOGIA	23
2.1 MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
2.2 Resíduos do beneficiamento da madeira.....	24
2.3 Resíduos plásticos	25
2.4 Caracterização da biomassa	25
2.4.1 Granulometria da biomassa.....	25
2.4.2 Determinação da massa específica real e aparente	27
2.4.3 Análise imediata	29
2.4.3.1 Determinação do teor de umidade.....	29
2.4.3.2 Determinação do teor de materiais voláteis	30
2.4.3.3 Determinação do teor de cinzas	31
2.4.3.4 Determinação do teor de carbono fixo.....	31
2.5 Poder calorífico e densidade energética	31
2.6 Processo de Briquetagem	32

2.7 Análise termogravimétrica.....	33
2.8 Ensaios de compressão diametral dos briquetes.....	34
CAPÍTULO III	36
RESULTADOS	36
3.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
3.2 Granulometria	37
3.3 Análise imediata da biomassa	38
3.4 Massa específica da biomassa.....	39
3.5 Briquetes produzidos	40
3.6 Poder calorífico e densidade energética	42
3.7 Termogravimetria	44
3.8 Ensaios de compressão diametral dos briquetes	46
CAPÍTULO IV	49
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

APRESENTAÇÃO

O Brasil e o mundo em geral se encontram em um crescente aumento populacional o que acarreta em uma maior demanda e consumo de produtos energéticos. Entre as fontes de energia alternativa disponíveis, a biomassa destaca-se como uma fonte promissora, pois, a energia obtida através da conversão de biomassa somente recicla o CO₂ que foi retirado da atmosfera pela fotossíntese, apresentando-se como uma das alternativas energéticas mais seguras, desde que produzidas eficientemente (KALT; KRANZL, 2011).

As usinas térmicas que utilizam biomassa como combustível representam uma oportunidade de negócios e autossuficiência energética. Os resíduos de madeira configuram outra fonte de energia para as usinas térmicas a biomassa. Segundo Tuoto (2009) estima-se que sejam gerados no Brasil aproximadamente 30 milhões de toneladas de resíduos de madeira anualmente. O acúmulo de serragem no ambiente traz grandes problemas, principalmente pelo desprendimento de chorumes tóxicos que acabam atingindo os recursos hídricos (BRANCO et al., 2005).

Outra indústria que gera enormes quantidades de resíduos é a indústria dos plásticos. Esta indústria está em desenvolvimento constante, com o surgimento de tecnologias para atender às novas demandas que surgem a cada dia, e não é surpresa que a produção mundial de plástico tenha chegado aos 265 milhões de toneladas em 2010 (PLASTICS EUROPE, 2011). Os resíduos plásticos são valorosas fontes de matérias-primas, e podem ser transformados em energia pela queima ou em outros materiais poliméricos (AL-SALEM *et al.*, 2010).

Tendo em vista as problemáticas ambientais causadas tanto pelo acúmulo de serragem como de plásticos, sendo que este último leva muitos anos para se decompor no meio ambiente, prejudicando a flora, fauna e principalmente a vida aquática, este estudo visa agregar valor à estes resíduos, através da produção de briquetes para a combustão.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1 Biomassa

As biomassas atualmente são as matérias-primas mais abundantes para a produção de biocombustíveis e para bioenergia, com elevado potencial de substituição de combustíveis fósseis. Biomassa é toda a matéria orgânica de origem vegetal, composta principalmente por celulose, hemicelulose e lignina. Sendo normalmente resíduos agrícolas (cascas, bagaços e palhas) ou resíduos de atividades industriais (serragens, resíduos florestais), por exemplo, (BRAZ, 2014; LOURENÇO; TANNOUS, 2015).

A biomassa pode ser considerada uma fonte energética potencialmente limpa no que diz respeito a emissões atmosféricas, em decorrência do balanço líquido de CO₂ ser próximo de zero, não tem em sua composição metal pesado ou outras emissões que possam contribuir para o efeito estufa. A mesma é composta, em sua maior parte por cerca de 80% de carbono e oxigênio (CORTEZ *et al.*, 1990). Além disso, oferece outras vantagens quando comparada aos combustíveis fósseis, como baixas emissões de SO_x e conteúdo de azoto inferior ao carvão mineral (KHAN *et al.*, 2008).

Segundo Lora e Andrade (2004), o potencial energético da biomassa é enorme, tanto em escala mundial como no Brasil. Ao mesmo tempo, os biocombustíveis poderiam ser uma das soluções para o fornecimento de eletricidade em comunidades isoladas, contribuindo assim para o desenvolvimento das mesmas.

Uma das principais vantagens da biomassa é que, embora sua eficiência seja reduzida, seu aproveitamento pode ser feito diretamente, por intermédio da combustão em fornos, caldeiras entre outros. Para aumentar a eficiência do processo e reduzir impactos socioambientais, tem-se desenvolvido e aperfeiçoado/ tecnologias de conversão mais eficientes, como a gaseificação e a pirólise, também sendo comum a cogeração em sistemas que utilizam a biomassa como fonte de energia. A médio e longo prazo, a exaustão de fontes não renováveis e as pressões ambientalistas poderão acarretar maior aproveitamento energético da

biomassa. Atualmente, a biomassa vem sendo cada vez mais utilizada na geração de eletricidade, principalmente em sistemas de cogeração e no suprimento de eletricidade para demandas isoladas da rede elétrica (ANEEL, 2005).

1.2 Biomassa florestal como fonte de energia

A biomassa florestal é definida como produtos e subprodutos dos recursos florestais que incluem basicamente biomassa lenhosa, produzida de forma sustentável a partir de florestas cultivadas ou de florestas nativas, obtida por desflorestamento de floresta nativa para abertura de áreas para agropecuária, ou ainda de origem industrial que processam ou utilizam a madeira para fins não energéticos, destacando-se a indústria de papel e celulose, indústria moveleira, serrarias, entre outras. O conteúdo energético da biomassa florestal está associado à celulose e lignina contidas na matéria e ao baixo teor de umidade. Seu aproveitamento no uso final energético se realiza, principalmente, através das rotas tecnológicas de transformação termoquímica mais simples, como combustão direta e carbonização, mas rotas mais complexas também são empregadas para a produção de combustíveis líquidos e gasosos, como metanol, etanol, gases de síntese, licor negro (um subproduto da indústria de celulose), entre outros (ANEEL, 2012).

A utilização da biomassa vegetal apresenta vantagens econômicas, visto que a utilização da biomassa como fonte de energia, apresenta mínimo custo de produção, principalmente no Brasil, que dispõe de uma grande área territorial para alcançar uma produção significativa (GOLDENBERG, 2007). Os tipos de madeiras mais utilizados na região sul do Brasil são *Pinus spp.*, *Eucalyptus spp.* e *Araucaria angustifolia*, sendo estas duas primeiras oriundas de reflorestamento (HILLIG *et al.*, 2006). É conhecido como resíduo no setor florestal o que sobra da colheita florestal e do beneficiamento da madeira. Segundo Fontes (1994) os resíduos de madeira podem ser classificados em três tipos distintos:

a) serragem - resíduo originado da operação de serras, encontrado em todos os tipos de indústria, à exceção das laminadoras;

b) cepilho - conhecido também por maravalha, resíduo gerado pelas plainas nas instalações de serraria/beneficiamento e beneficiadoras (indústrias que adquirem a madeira já transformada e a processam em componentes para móveis, esquadrias, pisos, forros, etc.);

c) lenha - resíduo de maiores dimensões, gerado em todos os tipos de indústria, composto por costaneiras, aparas, refilos, resíduos de topo de tora, restos de lâminas.

1.2.1 Resíduo de beneficiamento da madeira: serragem

A serragem é o produto da passagem da lâmina de serra na tora, formada por pequenas partículas de madeira cujo volume é bastante significativo. Os resíduos gerados com o beneficiamento da madeira estão entre 20 e 40% do total de madeira beneficiada (IBQP, 2002). A serragem possui dimensões entre 0,5 a 2,5 mm, acima disto, são consideradas maravalha, os cavacos que são resíduos maiores apresentam dimensões em torno de 50 x 20 mm (HILLIG et al. 2006).

O acúmulo de serragem no meio ambiente gera grandes problemas, principalmente pelo desprendimento de chorumes tóxicos que acabam atingindo os recursos hídricos. No Brasil, um sério problema ambiental é a contaminação dos solos e de lençóis freáticos por causa do acúmulo de resíduos das indústrias madeireiras. Cerca de 14% do volume de toras processadas em serrarias da região Sul se transformam em serragem. Embora parte deste volume seja usada como combustível ou destinado a outras aplicações, existe um grande excedente não utilizado, principalmente nas pequenas serrarias, onde o rendimento no processamento é geralmente mais baixo. Normalmente, parte desta serragem é queimada, disposta em aterros inadequados ou até mesmo disposta no pátio da indústria, acarretando o desprendimento de chorumes, de alta carga orgânica tóxica (REMADE, 2005). Segundo

Demirbas *et al* (2009) a serragem pode ser utilizada como fonte de geração de energia elétrica, com o processo de combustão.

1.3 Resíduos plásticos e reaproveitamento

O consumo de plásticos no Brasil e no mundo vem aumentando ao longo do tempo, numa clara demonstração do enorme sucesso conseguido por esse material nas mais variadas aplicações (ABIPLAST, 2003). As sacolas plásticas eram motivos de orgulho das redes de supermercados e passaram de símbolo da modernidade para vilãs do meio ambiente, devido a seu longo período de decomposição que pode levar de 100 a 300 anos.

As sacolas plásticas são utilizadas, descartadas e permanecem no meio ambiente poluindo e comprometendo a vida dos animais (PLANETA SUSTENTÁVEL, 2007). Nos mares, podem matar animais como tartarugas, que são vítimas frequentes, pois, confundem o material com as águas-vivas, sua presa natural (POZZANA, 2010).

A palavra “plástico” tem origem no grego *plástikos*, que significa moldáveis, a principal característica destes materiais. São feitos de cadeias poliméricas inquebráveis. Nas sacolas de supermercados a matéria-prima é o plástico filme, produzido a partir de uma resina chamada polietileno linear, polietileno de alta densidade ou de polipropileno (ALMEIDA, 2008).

O polietileno de baixa densidade (PEBD) possui uma densidade entre 0,912- 0,925 g/cm³ e uma resistência à tração de 6,9 a 16 Mpa, enquanto que o polietileno de alta densidade (PEAD) possui uma densidade entre 0,962 a 0,968, resistência à tração de 25 a 45 Mpa e calor de combustão de 46,0 kJ/g (COUTINHO *et al.*, 2003).

1.3.1 Poder calorífico dos plásticos

O plástico de um modo geral possui um dos maiores potenciais energéticos em termos de poder calorífico, ficando abaixo apenas da

borracha como pode ser visualizado na Tabela 1. Existem diversos processos como a pirólise, gaseificação, liquefação entre outros, que de forma direta ou indireta, aproveitam esta energia contida nos plásticos para a produção de combustíveis (FERREIRA, 2012).

Tabela 1 - Poder calorífico de alguns materiais

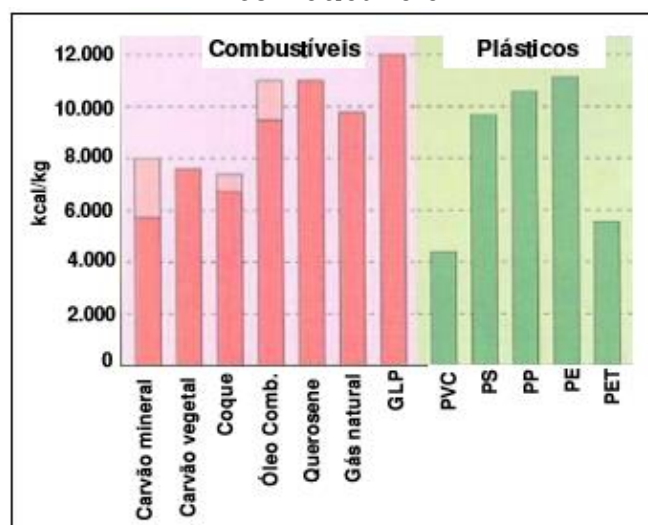
Material	Kcal/Kg
Plásticos	6300
Borracha	6780
Madeira	2520
Couro	3630
Papel	4030

Fonte: Adaptado de (EPE, 2008)

Podemos observar também pela Tabela 1 que o papel possui um alto poder calorífico, ficando acima do couro. Quando se avalia o poder calorífico pelo tipo de resina, verifica-se que o polietileno possui o maior potencial energético dos plásticos, cabendo destacar, que é o polímero com maior participação nos resíduos sólidos urbanos (FERREIRA, 2012). A Figura 1 apresenta uma comparação dos principais plásticos com os principais combustíveis existentes. Pela Figura 1 os plásticos quando comparados com outros combustíveis tradicionais utilizados na siderurgia, por exemplo, possuem potencial energético médio muito semelhante ao carvão vegetal, mineral e ao coque (FERREIRA, 2012).

A queima dos resíduos plásticos para gerar calor, vapor ou energia pode ser uma alternativa, para a destinação dos resíduos urbanos como um todo. Estima-se que a incineração de resíduos plásticos proporcione uma redução de 90 a 99% em volume, diminuindo assim o descarte em aterros. No processo de recuperação de energia, a destruição de espumas e grânulos também destrói CFC's e outros agentes nocivos pelo aquecimento do plástico (AL-SALEM *et al.*, 2010) (HOPEWELL *et al.*, 2009).

Figura 1 – Comparação do poder calorífico de polímeros com combustíveis



Fonte: Adaptado de (PWMI, 2008)

Uma das formas de se elevar o desempenho dos altos-fornos consiste na injeção de materiais com alto teor de carbono, como finos de carvão ou óleo diretamente na região onde o ar quente é insuflado no alto-forno siderúrgico (GORNI, 2004). Segundo Lindenberg (1996) a comparação entre as análises químicas do carvão, óleo e sucata plástica mostra que elas são bastante similares, conforme se pode observar na Tabela 2. Através da Tabela 2 podemos observar que o plástico possui um elevado teor de Carbono e Hidrogênio se comparado com o carvão, verificando que apesar de possuir níveis de cloro um pouco mais elevado que o óleo e o carvão, o plástico possui baixos teores de metais pesados. Logo, devido ao seu elevado teor de carbono e hidrogênio e baixo teor de metais pesados, a sucata plástica também pode ser injetada em altos-fornos e coquerias no lugar do carvão pulverizado ou óleo.

Tabela 2 - Comparação entre as análises químicas de carvão pulverizado, óleo e sucata plástica

% em peso	Agente Redutor		
	Carvão	Óleo	Plásticos
Carbono	79,60	85,90	83,74
Hidrogênio	4,32	10,50	12,38
Enxofre	0,97	2,23	0,05
Cinzas	9,03	0,05	3,08
Cloro	0,20	0,04	0,75
Chumbo	0,0050	0,0001	0,0002
Cromo	0,0013	0,0002	0,0013
Níquel	0,0028	0,0075	0,0011
Vanádio	0,0045	0,0600	0,0002
Zinco	0,0065	0,0001	0,0073
Potássio	0,2656	0,0010	0,0170
Sódio	0,0816	0,0010	0,0200
Cobre	0,0015	0,0001	0,0013

Fonte: Adaptado de (LINDENBERG, 1996)

1.4 Briquetes

A produção de briquetes já é bastante conhecida no exterior, através da briquetagem de carvão vegetal, porém no Brasil esta técnica ainda é muito recente. Com o reaproveitamento dos resíduos como matéria-prima na produção dos briquetes, o que era resíduo se transformará em energia, auxiliando na preservação da natureza e na economia de custos (MARCHIORI, 2006).

O Brasil possui um enorme potencial na produção de briquetes, já que o país possui uma grande quantidade e diversidade de biomassa que pode ser aproveitada da melhor forma possível através dos diferentes modos de briquetagem (FERNANDES, 2012).

No Brasil são produzidos em torno de 1,2 milhões de toneladas de briquetes por ano. Dessas 930 mil toneladas são de origem florestal e 272 mil toneladas são provenientes de resíduos agrícolas (como o bagaço da

cana-de-açúcar, palha e casca de arroz, resíduos de caroço de algodão e açaí) (EMBRAPA, 2012).

Segundo Vale e Gentil (2008) a serragem, em algumas Regiões do Brasil, custa R\$ 10,00/ton, sendo vendida como briquete no mercado doméstico de varejo como padarias, pizzarias e churrascarias em até R\$ 290,00/ton. A Figura 2 ilustra tipos de briquetes produzidos por diversos materiais.

Figura 2 - Briquetes diversos



Fonte: FUNVERDE, 2018

Atualmente o Brasil possui cerca de 28 empresas fabricantes de briquetes e pellets, que distribuem para o mercado interno, porém com um enorme potencial de exportação (EMBRAPA, 2012). O Quadro 1 aborda as principais vantagens da utilização dos briquetes produzidos com resíduos florestais para a queima, em relação à utilização da Lenha.

Quadro 1 - Principais vantagens do briquete em relação à lenha

PARÂMETROS	LENHA	BRIQUETE
Poder Calorífico	Baixo: 1700-2500 kcal/kg	Alto: 4000-4800 kcal/kg
Umidade	Alta: 20 a 45%	Baixa: 8 a 12%
Rendimento	Irregularidade térmica, baixa uniformidade e temperatura de chama	Regularidade térmica, alta uniformidade e temperatura de chama
Consumo mensal de briquetes em caldeiras 4tn k/h	210 m ³	30 ton
Resíduos de Cinza, Fuligem e Fumaça	Alto Volume	Baixo Volume
Espaço Físico e Armazenamento	Ocupação de grande espaço	Ocupação de pequeno espaço
Manuseio, Mão De Obra	Dificuldade por não existir uniformidade, trabalhoso	Facilidade de manuseio por ter forma e embalagem padronizada

Higiene, Limpeza	Sujeita à umidade, bichos, contaminação	Limpo, seco, sem bichos, menor risco de contaminação
Licença Ambiental	Licenciamento e guia de transporte ATPF/RET do IBAMA, com taxas a pagar	Dispensado de guia de transporte e fiscalização. Sem Custos
Comercialização	Por m ³ (Imprecisão)	Por Peso (Exatidão)

Fonte: Adaptado de (CAIRES, 2010)

O emprego dos briquetes diante da lenha apresenta inúmeras vantagens tanto em relação ao seu potencial energético quanto em relação à redução de custos o que pode ser observado pelo Quadro 1. Segundo Vale e Gentil (2008), em comparação com a lenha, o briquete possui maior densidade energética, maior rapidez na geração de temperatura e calor, maior poder calorífico, umidade mais baixa, baixo volume de cinzas e fuligem, proporciona redução dos custos de transporte, menor custo de manuseio, infraestrutura de armazenamento, movimentação, mão-de-obra, encargos sociais, e maior apelo ambiental por ser produzido a partir de resíduos.

1.4.1 Processo de briquetagem

O processo de briquetagem consiste na densificação de resíduos por meio da aplicação de pressão, com o auxílio ou não de aglutinante, sendo que todos os resíduos de origem vegetais podem ser compactados pela briquetagem. A vantagem desse processo está em transformar um resíduo de baixíssima densidade em uma lenha ecológica de alta qualidade, pois, quando comparado à lenha, o briquete apresenta propriedades mais vantajosas para o uso energético e é utilizado como combustível de caldeiras, fornos comerciais e industriais, como em padarias, hotéis e pizzarias (Quirino, 2004).

Os briquetes têm em geral densidade de 650-1200 kg/m³, diâmetro de 50 a 100 mm e comprimento de 25 a 300 mm. Os pellets têm densidade de 650 a 700 kg/m³, diâmetro entre 6 e 16 mm, comprimento de 25 a 30 mm. Ambos têm Poder Calorífico Superior (PCS) de 16 a 18 MJ/kg e umidade de 7 a 12% (ROCHA, 2014).

A conformação de briquetes pode ter apenas água como ligante ou aglutinante, mas em geral o produto final apresenta baixa resistência mecânica. Os ligantes podem ser vegetais (amido de milho, ligninas, farinha de trigo, gomas, melaço), orgânicos (parafinas, piche, glicerina) ou minerais (argilas, silicato de sódio, cal), o teor de ligantes varia de 0 a 10% em massa (MASSARO, 2014). Moro (1987) definiu sete etapas para o processo de briquetagem, sendo elas:

- 1. Escolha do material:** Esta etapa refere-se a escolha da matéria-prima, do tipo de briquete que se pretende produzir e das características físico-químicas do material a ser utilizado;
- 2. Secagem:** Tem por finalidade retirar a umidade dos resíduos, para que o material atinja a umidade necessária para a realização da compactação;
- 3. Moagem dos resíduos:** Tem por objetivo triturar os resíduos, formando partículas menores. Desse modo, facilitando o processo de briquetagem e a ação de aglutinantes, se estes forem necessários;
- 4. Peneiramento:** Promove a seleção das partículas geradas na moagem em diferentes granulometrias;
- 5. Mistura com aglutinante:** O aglutinante é responsável pela aderência dos resíduos. Durante esta etapa deve-se levar em consideração a escolha do tipo e da qualidade do aglutinante, pois, estas estão diretamente relacionadas ao custo do processo. Esta etapa nem sempre ocorre, pois, alguns resíduos são capazes de se aglutinar apenas com a plastificação da lignina em ambiente de alta pressão e temperatura, porém, será necessário maior gasto de energia e desgaste do equipamento;
- 6. Prensagem:** A prensagem proporciona resistência aos briquetes. É realizada por meio da ação de prensas que aplicam altas pressões e temperaturas a massa de resíduos e ao ligante. Esta etapa define a forma final do briquete, de acordo com a prensa utilizada;

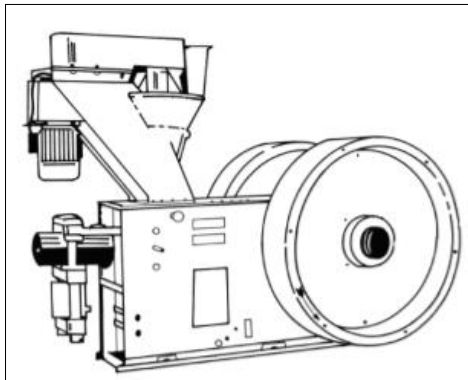
7. Estocagem e embalagem: Os briquetes devem ser armazenados em silos de estocagem e posteriormente são embalados para o consumo.

1.4.2 Processos de compactação

Segundo Quirino (2004), existem cinco tipos de equipamentos ou princípios básicos de compactação de resíduos lignocelulósicos:

- I. **Prensa extrusora de rosca sem fim** – utilizado no exterior, apresenta excelentes resultados. Seu princípio mecânico é semelhante às marombas da indústria de cerâmica.
- II. **Prensa hidráulica** - equipamento que utiliza um pistão acionado hidráulicamente. O material a ser compactado é alimentado lateralmente por uma rosca sem fim. Uma peça frontal ao embolo abre a expulsa o briquete quando se atinge a pressão desejada.
- III. **Prensa extrusora de pistão mecânico** - Um pistão ligado excentricamente a um grande volante força o material a ser compactado por meio de um tronco de cone. No Rio Grande do Sul existe fábrica deste equipamento. Pode-se observar as características do equipamento ao processo de produção pela Figura 3 abaixo.
- IV. **Peletizadora** - é um equipamento que opera pelo processo extrusivo. É o princípio dos equipamentos de produção de ração animal, onde há necessidade de injeção de vapor para aquecer e corrigir a umidade.
- V. **Enfardadeira** - como o próprio nome indica, o equipamento comprime e amassa o resíduo. Não exige pré-secagem do material, o que permite a secagem posterior.

Figura 3 - Prensa Extrusora de Pistão Mecânico



Fonte: QUIRINO, 2014

1.5 Combustível e combustão

Combustível é toda e qualquer matéria orgânica que ao sofrer ignição pode queimar gerando calor e energia (BUCK, 1970). A combustão pode ser definida como uma reação de oxidação, gerando calor e luz e/ou uma reação de oxidação lenta liberando pouco calor, sem emissão de energia luminosa. Esta reação ocorre em elevadas temperaturas entre um combustível e um comburente normalmente o oxigênio (TURNS, 2013; BARRETO *et al*, 2008).

A madeira pode gerar energia pela sua combustão tanto em sistemas abertos quanto sistemas fechados. O processo de combustão começa pela vaporização da água presente na estrutura da madeira. Subsequentemente os seus compostos combustíveis e não combustíveis são induzidos em temperaturas em torno de 100°C a 600°C, volatilizando cerca de 75 a 85% da substância madeira. A etapa final da combustão é o processo de oxidação completa do carbono que ocorre em duas etapas: formação de dióxido de carbono mostrada na Equação (1), pela combinação do carbono da madeira e formação de água apresentada pela Equação (2) pela combinação do hidrogênio da madeira com o oxigênio.



O hidrogênio (H) é um elemento combustível, e a água é o produto de sua combustão (COUTO *et al.*, 2018).

1.6 Carvão vegetal

O carvão vegetal pode ser obtido a partir da queima ou carbonização de madeira como de resíduos florestais, após o processo o material adquire uma coloração escura. No cotidiano o carvão vegetal é utilizado como combustível de aquecedores, lareiras, churrasqueiras e fogões a lenha, além de abastecer alguns setores industriais, como as siderúrgicas. O carvão ativado é utilizado na medicina, para desintoxicação e outras aplicações. Enquanto o coque (carvão mineral) emite, desde sua extração até a queima nos fornos siderúrgicos, 1,65 toneladas de dióxido de carbono (CO_2) e fixa 1,53 toneladas de oxigênio por tonelada de aço produzida, o carvão vegetal sequestra 16,33 ton de CO_2 e regenera a mesma quantidade de oxigênio por tonelada de aço. Enquanto o coque libera sete quilos de óxido de enxofre (SO_2), o carvão vegetal é praticamente isento dessa substância (FERREIRA, 2006).

A principal matéria-prima para a fabricação do carvão vegetal é a madeira (lenha). Esta pode ser dividida em dois grupos principais: madeira nativa e madeira de reflorestamento. O Eucalipto é o mais utilizado por causa das suas propriedades (químicas físicas e econômicas).

A Pirólise ou combustão para alguns autores é o processo físico-químico no qual ocorre uma ruptura da estrutura molecular original de um determinado composto pela ação do calor em um ambiente com pouco ou nenhum oxigênio. Seu balanço energético é positivo, ou seja, produz mais energia do que consome. O resultado do processo é a formação de um resíduo sólido rico em carbono (carvão) e uma fração volátil composta de gases e vapores orgânicos condensáveis (licor pirolenhoso). As proporções desses compostos dependem do método de pirólise empregado, dos parâmetros do processo e das características do

material a ser tratado (BEENACKERS e BRIDGWATER, 1989). A lignina contribui para a formação de cerca de 50% do carbono fixo na fração sólida. Portanto, materiais com alto teor de lignina são mais apropriados para a obtenção de alta concentração de carbono fixo na fração sólida (ANTAL *et al.*, 1991). A pirólise pode ser também realizada utilizando briquetes resultantes de processos de compactação de resíduos vegetais com a pirólise, esses briquetes adquirem maiores teores de carbono e poder calorífico, podendo ser utilizados com maior eficiência na produção de energia e também como redutores siderúrgicos.

1.7 Poder calorífico superior e inferior

O poder calorífico é a quantidade de energia em calorias liberada por um material em sua combustão completa. Quando ocorre a combustão completa de uma unidade de combustível este libera energia térmica e geralmente é medido em termos da energia por conteúdo por unidade de massa ou volume (QUIRINO, 1987; NOGUEIRA, 2008).

O Poder Calorífico pode ser dividido em Superior e Inferior:

a) **Poder Calorífico Superior (PCS):** O poder calorífico superior fornece a quantidade de energia máxima liberada pela combustão neutra, que ocorre na presença de nitrogênio sem excesso de oxigênio, e a água produzida nessa reação é condensada (COUTO *et al.*, 2018). O PCS pode ser obtido de duas maneiras: Através da Bomba Calorimétrica, na qual consiste em colocar uma determinada quantidade de biomassa dentro de uma bomba calorimétrica seguindo os procedimentos ditados pela NBR 8633 (Carvão Vegetal: Determinação do Poder Calorífico), a qual dará o valor do PCS, ou pela Análise Elementar, pois através da mesma é possível relacionar do PCS de uma biomassa com a quantidade de ligações químicas envolvendo seus elementos. Conhecendo-se a fração mássica dos componentes da biomassa, então consequentemente é possível calcular o PCS (KLATAU, 2008).

O PCS é avaliado nas condições normais de temperatura e pressão (25°C e 1 atm). É importante analisar que o PCS da madeira varia em relação às espécies, mas pode ser arranjado em duas categorias: madeira de folhosas e madeira de coníferas, portanto é necessário utilizar valores médios para o PCS. Alguns estudos correlacionam o PCS a diferentes parâmetros como a composição química elementar obtendo-se alguns modelos como o apresentado na Equação (3) abaixo (COUTO *et al.*, 2018).

$$PCS = 35530X_c + 112860X_h + 10870 (X_sX_o) \quad (3)$$

Em que:

PCS = Poder Calorífico Superior expresso em kJ/kg;

X_c = Fração mássica em carbono na madeira absolutamente seca;

X_h = Fração mássica em hidrogênio na madeira absolutamente seca;

X_s = Fração mássica de enxofre na madeira absolutamente seca;

X_o = Fração mássica em oxigênio na madeira absolutamente seca.

- b) **Poder Calorífico Inferior (PCI):** O Poder Calorífico Inferior é a quantidade é a quantidade de calor máxima fornecida pela combustão neutra de uma unidade de massa de combustível quando a água formada pela combustão permanece no estado vapor. O PCI (PCI, as) em kJ/kg é calculado a partir do PCS, porém considera-se o teor de umidade que está presente no combustível. O PCI anidro ou absolutamente seco é aquele obtido apenas considerando a água que é formada pelo hidrogênio combustível e pode ser expresso pela seguinte Equação (4) (COUTO *et al.*, 2018).

$$PCI, as = PCS - 9LX_h \quad (4)$$

CAPÍTULO II

METODOLOGIA

2.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais empregados, os métodos e procedimentos adotados para o desenvolvimento do trabalho de conclusão de curso.

O trabalho proposto foi realizado na Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA - *campus* Bagé, com a utilização dos laboratórios do curso de engenharia química para realização da caracterização da amostra, realização da análise imediata, picnometria gasosa, TGA e confecção dos briquetes. Também foi utilizado o Laboratório de Energia e Carboquímica (LEC) do curso de engenharia química para obtenção do poder calorífico das amostras e por fim foi utilizado o laboratório do curso de engenharia de produção para a fabricação do molde de aço para produzir os briquetes e para realização dos testes de resistência mecânica. Os materiais e métodos utilizados são apresentados a seguir.

2.2 Resíduos do beneficiamento da madeira

A biomassa utilizada neste trabalho é resultado do processo de beneficiamento de madeiras florestais e é oriunda de uma indústria madeireira de pequeno porte localizada na cidade de Bagé/RS. A Figura 4, apresenta os resíduos de madeira coletados.

Figura 4 - Serragem coletada



Fonte: Autores, 2019

2.3 Resíduos plásticos

Os resíduos plásticos utilizados, neste trabalho foram sacolas plásticas provenientes de supermercados. Estes plásticos foram recolhidos pela autora do trabalho e foram cortados com o uso de uma furadeira de papel, obtendo um diâmetro de 0,35mm. A Figura 5 abaixo apresenta estes resíduos já cortados.

Figura 5 - Resíduos plásticos de polietileno de alta densidade



Fonte: Autores, 2019

2.4 Caracterização da biomassa

Para levantamento das propriedades físicas da biomassa *in natura* foram realizados ensaios granulométricos e determinação da massa específica.

2.4.1 Granulometria da biomassa

Para a confecção dos briquetes é importante que a biomassa e os resíduos plásticos tenham uma granulometria reduzida, para tanto, foi realizado a moagem dos mesmos em um moinho de facas da marca Marconi, apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Moinho de Facas



Fonte: Autores, 2019

Para a determinação da distribuição granulométrica das partículas de biomassa, foi realizado um ensaio de peneiramento, utilizando um conjunto de peneiras da série Tyler com abertura de (9, 16, 32, 60, 115, e 270 mesh) e um agitador de peneiras da marca Bertel Indústria Metalúrgica Ltda como mostrado na Figura 7 abaixo. Foi pesado aproximadamente 100g de serragem moída e colocada no conjunto de peneiras, agitando-se por 10 min a 6rpm, este procedimento ocorreu em triplicata.

Figura 7 - Peneiramento da serragem



Fonte: Autores, 2019

Após o peneiramento obteve-se a curva de distribuição granulométrica em função da porcentagem da massa retida nas peneiras

e do diâmetro médio das partículas. A Figura 8 apresenta a distribuição granulométrica da biomassa para o conjunto de peneiras estudado.

Figura 8 - Distribuição Granulométrica da biomassa nas peneiras



Fonte: Autores, 2019

Foram realizados ensaios preliminares de briquetagem sem ação de calor, para determinar qual a melhor granulometria a ser utilizada. Os testes realizados com granulometrias de 9, 16 e 32 mesh, não obtiveram resultados satisfatórios, proporcionando uma maior fragilidade dos briquetes. Portanto, a fim de reduzir gastos com energia, aproveitar quase toda a matéria-prima e não comprometer a estrutura do briquete foram escolhidas para a confecção dos briquetes as granulometrias que ficaram retidas nas peneiras 60, 115 e 270 mesh.

2.4.2 Determinação da massa específica real e aparente

Foi determinado a massa específica real e granel da biomassa e a massa específica aparente dos briquetes produzidos, visto que esta característica influencia nos resultados.

A massa específica real dos briquetes (ρ_b) foi determinada através da relação entre a massa do briquete (m_b) e volume do briquete (V_b), apresentado na Equação 5 abaixo. A massa do briquete foi obtida através de uma balança analítica e o seu volume foi determinado com a utilização de um paquímetro digital.

$$\rho_b = \frac{m_b}{V_b} \quad (5)$$

A massa específica real (ρ_r) da biomassa foi obtida por meio de picnometria gasosa, utilizando-se uma balança analítica (Shimadzu, AUY220) com precisão de $\pm 0,0001$ g e picnômetro de gás hélio (marca Quantachrome Instruments, ULTRAPYC 1200e), conforme mostrado na Figura 9 abaixo.

Figura 9 - Picnometria gasosa



Fonte: Autores, 2019

A massa específica a granel ou *bulk* (ρ_g) da serragem foi determinada através do ensaio de proveta. Para tanto, a amostra foi pesada em triplicata, com um volume específico na proveta, conforme mostrado na Figura 10, e com o uso da Equação 6 teve sua massa específica a granel determinada.

$$\rho_g = \frac{m_p}{v_T} \quad (6)$$

Em que: v_T é o volume total da amostra na proveta; m_p é a massa de partículas.

Figura 10 - Massa específica a granel



Fonte: Autores, 2019

Além disso, foi determinada a porosidade do leito das partículas pela relação da massa específica real e aparente. A porosidade do leito de partículas (ε) foi obtida através da Equação 7, que relaciona ρ_g e ρ_r .

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_g}{\rho_r} \quad (7)$$

2.4.3 Análise imediata

A análise imediata foi realizada para a biomassa *in natura*, seguindo metodologia, conforme a norma ASTM para carvão vegetal. Foram determinados o Teor de Umidade através da norma ASTM D3173-11 que determina a facilidade de compactação da amostra, o Teor de Materiais Voláteis (ASTM D3175-17), Teor de Cinzas (ASTM D3174-12) e Teor de Carbono Fixo.

2.4.3.1 Determinação do teor de umidade

O Teor de Umidade (U) das amostras foi determinado em estufa da marca Nova Ética de modelo 400/ ND, conforme a Figura 11, seguindo a norma ASTM D3173-11 e E 871. Em um cadinho foi inserido aproximadamente 1g de amostra, a seguir a amostra foi encaminhada para a estufa permanecendo por 48 horas a 105°C. Transcorrido o tempo às amostras foram resfriadas em um dessecador por 30 minutos e pesadas em uma balança analítica. O teor de umidade pode ser obtido através da Equação 8.

$$U = \frac{m_i - m_f}{m_i} * 100 \quad (8)$$

Em que:

m_i é a massa inicial do material antes da secagem;

m_f é a massa final do material após a secagem.

Figura 11 - Estufa



Fonte: Autores, 2019

2.4.3.2 Determinação do teor de materiais voláteis

Após a determinação do teor de umidade, a mesma amostra de biomassa foi introduzida em um forno tipo mufla da marca ZEZIMAC, como mostrado na Figura 12, por seis minutos a 950°C, conforme a norma ASTM D3175-17 e E 872. Subsequentemente, a amostra foi colocada em um dessecador para resfriamento e posterior pesagem. O teor de materiais voláteis (Tmv) pode ser obtido pela Equação 9.

$$Tmv = \frac{m_f - m_{vol}}{m_f} * 100 \quad (9)$$

Em que:

m_f é a massa final do material após a perda de umidade;

m_{vol} é a massa após a volatilização do material em mufla.

Figura 12 - Mufla



Fonte: Autores, 2019

2.4.3.3 Determinação do teor de cinzas

As amostras já sem umidade e voláteis foram colocadas novamente na mufla a 300°C, até atingir 750°C, permanecendo por 2 horas, conforme o recomendado nas normas ASTM D3174-12 e ASTM D1102-84. O teor de cinzas (T_c) foi calculado utilizando a Equação 10 a seguir.

$$T_c = \frac{m_{vol} - m_{comb}}{m_{vol}} * 100 \quad (10)$$

Em que: m_{comb} é a massa após a combustão do material na mufla.

2.4.3.4 Determinação do teor de carbono fixo

O Teor de Carbono Fixo (TC_F) das amostras é dado pela Equação 11.

$$TC_F = 100 - (Tmv + Tc) \quad (11)$$

2.5 Poder calorífico e densidade energética

O Poder Calorífico das amostras foi determinado no Calorímetro da marca Parr de modelo 6200, conforme ilustrado na Figura 13, que está localizado no LEC. Neste procedimento as amostras da biomassa *in natura* e dos briquetes moídos contendo serragem e plástico, foram colocadas previamente secas, com massa de 1,0g na bomba calorimétrica, para quantificar o Poder Calorífico Superior.

Figura 13 - Calorímetro



Fonte: Autores, 2019

A densidade energética da serragem (*DEs*) foi obtida através do produto entre o poder calorífico inferior e a densidade a granel da biomassa, conforme mostrado na Equação 12. A densidade energética dos briquetes (*DEb*) foi obtida através do produto entre o poder calorífico superior e a densidade aparente dos briquetes, conforme o mostrado na Equação 13 abaixo.

$$DEs = PCI * \rho_g \quad (12)$$

$$DEb = PCS * \rho_b \quad (13)$$

Em que:

DEs é a densidade energética da biomassa em um determinado volume, é expressa em gigacalorias/metro cúbico (Gcal/m³);

DEb é a densidade energética dos briquetes em um determinado volume em (Gcal/m³);

PCS e *PCI* representam o poder calorífico superior e inferior respectivamente, dados em quilocalorias/metro cúbico (kcal/m³).

2.6 Processo de Briquetagem

Para a produção de briquetes, fez-se uso da biomassa moída nas granulometrias de 60, 115 e 270 mesh, sem o uso de aglutinante. Adotou-se esse método para que o trabalho fosse eficaz em mostrar o rendimento energético do material sem nenhum tratamento, juntamente com seu baixo custo de produção e alta eficiência. Foram devidamente separados e pesados cerca de 25g de serragem, que em seguida foram inseridos no molde dos briquetes. Esta massa foi adotada, pois, preenche todo o volume do molde. O mesmo procedimento ocorreu para os briquetes contendo plástico PEAD, utilizando uma massa de 25g de serragem e 1 g de PEAD, como mostrado na Figura 14 abaixo.

Figura 14 - Mistura de serragem e plástico PEAD



Fonte: Autores, 2019

Posteriormente, foi ligado o aquecimento através de uma resistência elétrica que contornava o molde. A amostra foi aquecida até a temperatura de 200°C, pois, essa temperatura era a ideal para que a lignina presente na serragem se tornasse adesiva e o plástico presente derretesse podendo realizar a função do aglutinante. A temperatura foi controlada com o uso de um termômetro de infravermelho. O material foi comprimido sob pressão de 200 kgf/cm² e temperatura de 200°C durante 10 minutos, como mostrado na Figura 15. Após este período, o material foi retirado, resfriado em temperatura ambiente e teve suas propriedades determinadas.

Figura 15 - Processo de Compactação



Fonte: Autores, 2019

2.7 Análise termogravimétrica

A variação da massa dos briquetes moídos em função do tempo e temperatura foi determinada no TGA 50 da marca Shimadzu acoplado em um analisador térmico TA60WS da mesma marca como mostrado na Figura 16, sob atmosfera inerte com nitrogênio com taxa de aquecimento

de 10°C/min a partir da temperatura ambiente até 900°C, com uma vazão de gás de 50mL/min. A massa inicial da amostra de briquete contendo plástico moído foi de 5,818mg e para o briquete sem plástico moído foi de 5,759mg.

Figura 16 - TGA



Fonte: Autores, 2019

2.8 Ensaios de compressão diametral dos briquetes

Para a determinação da resistência mecânica dos briquetes em relação ao transporte e armazenamento, foi realizado o ensaio de resistência mecânica por compressão diametral na máquina de ensaio universal EMIC, conforme apresentado na Figura 17. Utilizou-se a norma NBR 5739 de 2018, para ensaios de compressão diametral e para determinar a resistência máxima a compressão dos briquetes. A NBR 5739, diz respeito a estruturas de concreto, porém, como não há uma norma brasileira referente a este ensaio com briquetes, utilizou-se esta NBR.

Figura 17 - Ensaio de Compressão Diametral



Fonte: Autora, 2019

Para a realização deste ensaio foi utilizada uma célula de carga de 100kN e uma velocidade de deslocamento de 1,0 mm/min. Foram realizados 2 ensaios, o primeiro com 10 corpos de prova de briquetes de serragem e o segundo com 10 corpos de prova de briquetes contendo plástico e serragem. A resistência à compressão dos briquetes foi obtida através da Equação 15.

$$Rc = \frac{2F}{\pi DL} \quad (15)$$

Rc é a resistência a compressão diametral, expressa em megapascals (Mpa); F é a carga máxima suportada pelo briquete em Newtons (N); D é o diâmetro do briquete dado em milímetros (mm) e; L é o comprimento do briquete em mm.

Para o cálculo da altura máxima de empilhamento, primeiramente foi calculado, o número de amostras empilhadas verticalmente (N_{emp}), que foi obtido pela força máxima de ruptura (F), por um fator de segurança (fs) e pela massa final das amostras. O N_{emp} representa a quantidade máxima de amostras empilhadas que um tratamento suporta. A força F dada em quilograma-força foi obtida pelo ensaio de compressão. O fs foi considerado como 300%, e a massa utilizada, foi a final dos briquetes (mb). A Equação 16 apresenta o cálculo do número de amostras empilhadas verticalmente.

$$N_{emp} = \frac{F}{fs \times mb} \quad (16)$$

A partir do N_{emp} foi possível calcular a altura do empilhamento (H_{emp}), dado pela Equação 17.

$$H_{emp} = \frac{N_{emp} \times D}{100} \quad (17)$$

Em que: N_{emp} é o número de amostras empilhadas; H_{emp} é a altura máxima de empilhamento dada em metros.

CAPÍTULO III

RESULTADOS

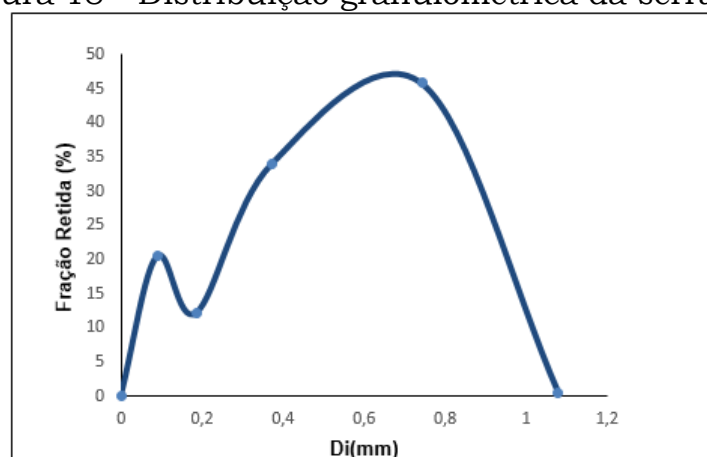
3.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os principais resultados da caracterização da biomassa que são imprescindíveis no processo de compactação, bem como apresenta a comparação dos dois tipos de briquetes produzidos para fins energéticos.

3.2 Granulometria

A Figura 18 abaixo, apresenta a curva da distribuição granulométrica para a serragem em função do diâmetro médio das partículas e da porcentagem de fração retida nas peneiras com aberturas de 16, 32, 60, 115 e 270 mesh.

Figura 18 - Distribuição granulométrica da serragem



Fonte: Autores, 2019

Pela Figura 18 Podemos observar que a maior parte do material se encontra com um diâmetro médio de aproximadamente 0,74 mm de diâmetro. Este valor é dependente do processo de moagem, de qual peneira é utilizada no moinho de facas e do tempo de moagem. Segundo Ginâni (2013) a granulometria das partículas influencia no processo de compactação da serragem, interferindo na resistência mecânica do produto final. Pois, a presença de partículas menores ajuda a preencher os espaços vazios, tornando os briquetes mais resistentes, fato este que foi comprovado visivelmente nos ensaios realizados.

3.3 Análise imediata da biomassa

Foi realizada a análise imediata da serragem, verificando o teor de umidade, cinzas, voláteis e carbono. A Tabela 3 abaixo apresenta os resultados obtidos com a análise imediata.

Tabela 3 - Análise imediata da serragem

Serragem	Autora (2019)	Peraça (2018)	Oliveira et al. (2017)	Souza e Vale (2016)
Teor de Umidade (%)	11,7	10,2	12	7,49
Teor de Voláteis (%)	86,94	84,9	82	84,92
Teor de Cinzas (%)	0,81	0,3	0,83	0,19
Teor de Carbono Fixo (%)	13,8	4,6	17,3	14,89

Fonte: Autores, 2019

Os valores informados pela Tabela 3 demonstram que o ensaio da análise imediata obteve valores esperados se comparados com a literatura, mas estes valores dependem das características da madeira florestal e do solo no qual esteve plantada. Segundo Vieira (2012), biomassa com alto teor de voláteis apresenta maior reatividade, ou seja, maior facilidade de incendiar e queimar devido à quantidade de materiais volatéis que volatilizam durante o aquecimento. O resultado obtido de teor de voláteis foi satisfatório, uma vez que apresentou valor de 86,94% um pouco mais elevado do que os demais autores.

O Teor de Cinzas está diretamente relacionado com a capacidade de absorção de micronutriente do solo pelas árvores. Teores elevados de cinzas diminuem a eficiência do processo de combustão diminuindo o poder calorífico e causando perda de energia, já que necessita de um maior consumo de oxigênio (HOFFMANN, 2010).

O Teor de Carbono Fixo apresentou valor próximo ao da literatura, sendo este de 13,8%. Os autores Brito e Barrichello (1982), recomendam teores de carbono fixo entre 14 a 25% e afirmam que combustíveis com elevado teor de carbono fixo queimam mais lentamente, acarretando em elevado tempo de residência das biomassas nos queimadores.

3.4 Massa específica da biomassa

A Tabela 4 abaixo apresenta os valores obtidos para a massa específica a granel e real da serragem e a porosidade do leito formado por estas partículas.

Tabela 4 - Massa específica da serragem

Parâmetros	Serragem
$\rho_g \left(\frac{kg}{m^3}\right)$	227,3
$\rho_r \left(\frac{kg}{m^3}\right)$	1533
ε	0,85

Fonte: Autores, 2019

A biomassa apresenta um valor de densidade a granel de 227,3 kg/m³, valor inferior ao encontrado por Quirino (2002) que foi de 274 kg/m³ e um valor superior ao encontrado por Peraça (2018) que foi de 190 kg/m³. Vale ressaltar que o valor da massa específica da serragem varia de acordo com a espécie da árvore. A serragem utilizada neste trabalho é uma mistura de *Pinus ssp.* e *Eucalyptus ssp.*, com Pinus em maior concentração.

A massa específica real encontrada para esta mistura de serragem foi de 1533 kg/m³ que apresenta valor comparado ao encontrado por Foelkel et al. (1971) *apud.* Peraça (2018) que foi de 1533 kg/m³. O valor encontrado para a porosidade das partículas de serragem foi de 0,85 próximo ao de Peraça (2018) que encontrou um valor de 0,87.

De acordo com Quirino (2012), quanto menor for a densidade a granel do resíduo, maior será o aumento do poder calorífico, quando o material for compactado, levando-se em consideração o volume desse material. Logo, uma massa específica a granel baixa, proporciona um maior ganho energético durante o processo de briquetagem.

3.5 Briquetes produzidos

Os briquetes produzidos com e sem plástico, são mostrados na Figura 19 a seguir.

Figura 19 - Briquetes BCP e BSP



Fonte: Autores, 2019

Os briquetes compostos somente por serragem apresentaram uma massa final média de 20g, sendo que sua massa inicial foi de 25g, essa diferença ocorre devido a perdas de massa durante o processo, e devido à evaporação da água presente na biomassa, quando se eleva a temperatura. O mesmo ocorrido foi observado nos briquetes contendo plástico, que possuíam uma massa total de 26 g antes da compactação e após o processo apresentaram uma massa média final de 22g. A Tabela 5 abaixo apresenta uma comparação física dos briquetes de serragem com plástico (BCP) e sem plástico (BSP).

Tabela 5 - Propriedades obtidas dos briquetes com plástico (BCP) e sem plástico (BSP)

Propriedades	BSP	BCP
Massa Inicial (g)	25	26
Massa final (g)	20	22
Altura média (cm)	2,83	2,83
Diâmetro médio (cm)	2,84	2,83
Massa específica (g/cm³)	1,1156	1,2358
Umidade Final (%)	5,56	1,53

Fonte: Autores, 2019

A altura e o diâmetro dos dois tipos de briquetes com e sem plástico, apresentaram valores médios aproximadamente iguais em torno de 2,83 cm. Estes valores são dependentes da massa inicial da amostra, da perda de massa durante o processo, da temperatura utilizada e do tempo nos quais os briquetes ficaram suportando a pressão exercida sobre eles. Pois, quanto maior o tempo de prensagem, menor será o tamanho do briquete, melhor será o empacotamento das partículas e ocorrerá uma contração do briquete dentro do molde devido o início do processo de resfriamento do molde. Segundo Rocha (2014) os briquetes possuem diâmetro entre 50 a 100 mm e comprimento entre 25 a 300 mm. O briquete produzido possuiu diâmetro menor que o utilizado comercialmente, devido ao fato de que foi utilizado para a fabricação do molde de aço-carbono, materiais já disponíveis no laboratório da UNIPAMPA, havendo, portanto, essa limitação do diâmetro.

A biomassa antes do processo de briquetagem apresentava um teor de umidade em torno de 27%, e após o processo de briquetagem os briquetes apresentaram valores menores de umidade, sendo de 5,56% para o briquete de serragem e de 1,53 % para o briquete de serragem com plástico, esta perda se refere à temperatura utilizada no processo e pode ser verificada pela massa final dos briquetes. O baixo teor de umidade do BCP sugere que uma parte da massa de plástico que foi acrescentada ao briquete também foi volatilizada com a ação do calor, além da perda de hemicelulose causando esta diferença nos valores de umidade do BCP e BSP. Estes valores baixos de umidade dos briquetes finais propiciam o aumento da liberação de energia durante a queima, porém, podem ocasionar a liberação de finos de serragem durante o transporte e armazenamento.

A massa específica básica ou aparente que relaciona a massa pelo volume do cilindro, encontrada para o briquete contendo somente serragem foi de 1115,6 kg/m³, enquanto que para o briquete contendo plástico e serragem este valor foi de 1235,8 kg/m³, devido a sua massa final ser mais elevada. Bezzon (1994) *apud* Gentil (2008) encontrou nos ensaios feitos na Universidade de Campinas-SP densidades aparentes

para os briquetes de serragem entre 1080 kg/m³ e 1120 kg/m³. De acordo com Quirino (2002), a densidade dos briquetes pode variar de 1000-1300kg/m³. Souza e Vale (2016) encontraram um valor de 1197kg/m³, para os briquetes produzidos com serragem de Pinus menores que 35 mesh na temperatura de compactação de 200°C.

3.6 Poder calorífico e densidade energética

O Poder Calorífico Superior (PCS) e o Poder Calorífico Inferior (PCI) dos briquetes moídos e das granulometrias de serragem utilizadas, bem como a densidade energética dos briquetes e serragem ,são apresentadas na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6 - Poder calorífico e densidade energética das biomassas e briquetes

	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)	DE (Gcal/m ³)
60 mesh	6475,1	6151,4	1,39
115 mesh	6641,6	6317,9	1,44
270 mesh	7449,6	7125,9	1,62
BSP moído (60,115 e 270 mesh)	7688,4	7364,7	8,58
BCP moído (60,115 e 270 mesh)	7913,6	7589,9	9,78

Fonte: Autores, 2019

Podemos observar pela Tabela 6 que quanto menor a granulometria como no caso da peneira de 270 mesh de diâmetro médio de 0,053mm, maior será o poder calorífico, pois, quanto menor é o tamanho da partícula maior é a área superficial de contato da mesma e consequentemente maior será seu poder de queima. A umidade da madeira também influencia no poder calorífico, a umidade elevada faz com que a água seja perdida na forma de vapor pelo sistema, levando consigo parte da energia que seria liberada na combustão.

O briquete contendo plástico (BCP) apresentou poder calorífico maior de 7913,6kcal/kg se comparado ao BSP que foi de 7688,4 kcal/kg,

valor que era esperado devido às propriedades térmicas do PEAD, devido ao fato de sua baixa umidade de 1,53 %, quando comparado ao BCP de 5,56%. Outra propriedade física dos briquetes que também influenciou neste resultado foi a massa específica dos briquetes, apresentando valor um pouco mais alto para o BCP.

De acordo com Pereira (2000) as madeiras mais densas apresentam maior poder calorífico por unidade volumétrica e madeiras mais leves possuem aproximadamente o mesmo poder calorífico por unidade de peso, mas possuem menor poder calorífico por unidade de volume. Realizando um tratamento térmico nos resíduos de *Pinnus* a 220°C Pincelli (2011), encontrou um valor de PCS de 5045 kcal/kg, que pode ser comparado aos valores do poder calorífico superior do BCP e BSP encontrados. Pois, durante o aquecimento de biomassa, se perde relativamente mais oxigênio e hidrogênio do que carbono, através da perda de água e um aumento no poder calorífico é o principal resultado disto (BERGMAN & KIEL, 2005).

A densidade energética dos briquetes foi obtida em termos de poder calorífico superior e densidade aparente do briquete dada em função de sua massa e volume. A densidade energética do briquete BCP apresentou um valor maior de 9,78 Gcal/m³ se comparado ao briquete sem PEAD, apresentando um valor de 8,58 Gcal/m³. A densidade energética dos briquetes foi obtida em termos de poder calorífico superior e densidade aparente do briquete dada em função de sua massa e volume. A densidade energética do briquete BCP apresentou um valor maior de 9,78 Gcal/m³ se comparado ao briquete sem PEAD, apresentando um valor de 8,58 Gcal/m³. A densidade energética da biomassa foi dada em termos de poder calorífico inferior e densidade a granel da serragem para os três tipos de granulometria 60, 115 e 270 mesh, sendo em média de 1,48 GCal/m³. Podemos observar que não houve diferenças significativas na densidade energética para todas as frações granulométricas, podendo ser usada qualquer uma delas.

Podemos observar pela Tabela 6, que houve um aumento aproximado de 5,8 vezes na quantidade de energia por unidade de volume

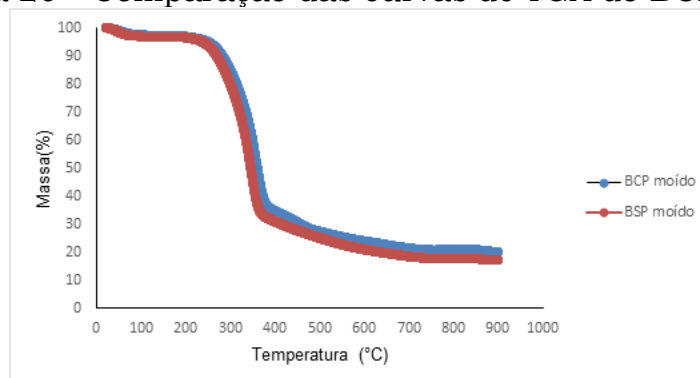
do briquete BSP em relação aos resíduos de madeira, confirmando a superioridade da qualidade energética dos briquetes.

Protásio *et al.* (2011) observaram para a serragem de eucalipto um valor de densidade energética de 4,17 Gcal/m³, tornando o resultado encontrado satisfatório. O alto poder calorífico encontrado para o BCP propicia seu uso para geração de energia, através da queima direta podendo ser utilizado em caldeiras para geração de vapor, fornos, termelétricas, gerando o vapor superaquecido que será transformado em energia elétrica entre outros aparelhos de queima.

3.7 Termogravimetria

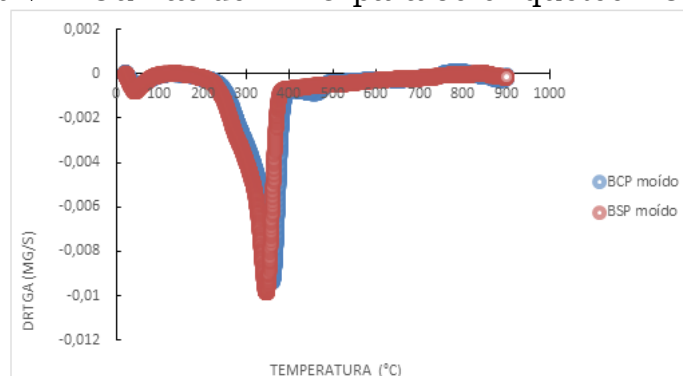
As Figuras 20 e 21 apresentam as curvas de TGA e DrTGA para as amostras de briquete de serragem moído (BSP) e briquete de serragem moído contendo plástico (BCP).

Figura 20 - Comparação das curvas de TGA do BCP e BSP



Fonte: Autores, 2019

Figura 21 - Curvas de DrTG para os briquetes BCP e BSP



Fonte: Autores, 2019

Pelas curvas de TGA para os dois tipos de amostras, verifica-se um comportamento semelhante. Uma primeira fase de perda de massa ocorre na temperatura ambiente até aproximadamente 110°C, perdendo aproximadamente 2,5% de massa para o BSP e 3,0% para o BCP.

A segunda etapa do processo de decomposição térmica ocorreu a partir de 208°C até atingir a temperatura de 380°C, observando uma perda de massa de 60% para o BCP e de 66% para BSP. Este valor mais baixo do BCP indica que o PEAD teve uma maior perda de massa na primeira etapa a 110°C, uma vez que seu ponto de fusão está compreendido entre 130°C.

A partir de 380°C a perda de massa diminui lentamente até que a massa final se torne estável. Podemos observar pela Figura 20, que neste processo de estabilização houve um ganho de massa pelo BCP a partir de 790°C até 860°C.

Segundo Gao et al. (2004), a celulose inicia a perda de massa em temperaturas principalmente acima de 300 °C e mais rapidamente completa seu ciclo de perda até a carbonização, tendo a maior quantidade de voláteis de todos os componentes da madeira. No entanto, a lignina e hemicelulose se decompõem com taxas mais baixas e com maior perda de massa na carbonização. É sabido que, na carbonização da madeira, a hemicelulose é o primeiro composto a se degradar e a lignina, o último.

Bartkowiak e Zakrzewski (2004) comentaram que a lignina é termicamente mais resistente que os carboidratos componentes da madeira. Em temperaturas de até 600 °C, a perda de massa da hemicelulose alcança cerca de 95%; na celulose, esse percentual fica em torno de 80%, enquanto na lignina não excede 60%.

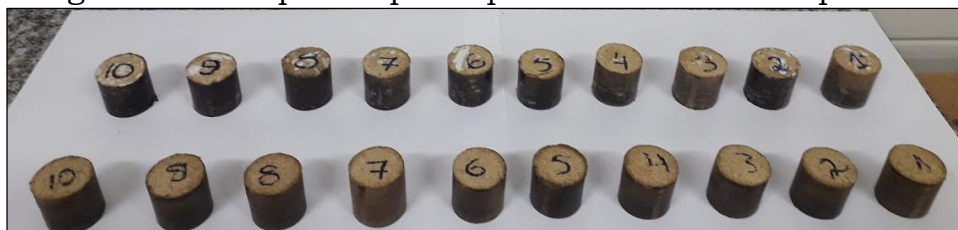
Analisando a Figura 21 observa-se que para o BSP houve a presença de dois picos, sendo o primeiro em 50°C decorrente da perda de água e alguns voláteis da madeira. O segundo pico mais proeminente foi compreendido entre as temperaturas de 250°C e 380°C, indicando a decomposição rápida da celulose e as decomposições mais lentas da lignina e hemicelulose. O mesmo ocorre para o BCP, porém, podemos

observar também que houve uma perda de massa do material em uma faixa compreendida entre 420°C e 470°C, indicando o processo de decomposição da lignina. Para Raad *et al* (2006), os componentes da madeira se decompõem em diferentes faixas de temperatura: a hemicelulose entre 200 e 300 °C, a celulose entre 240 e 350 °C e a lignina entre 350 e 500°C, corroborando com os picos de perda de massa encontrados na Figura 21.

3.8 Ensaios de compressão diametral dos briquetes

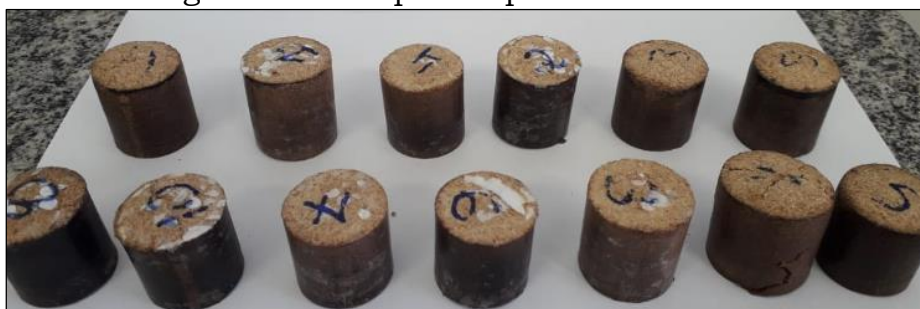
A Figura 22 apresenta os corpos de prova submetidos ao ensaio de compressão e a Figura 23 apresenta os corpos de prova já rompidos por compressão.

Figura 22 - Corpos de prova para o ensaio de compressão



Fonte: Autores, 2019

Figura 23 - Corpos de prova tracionados

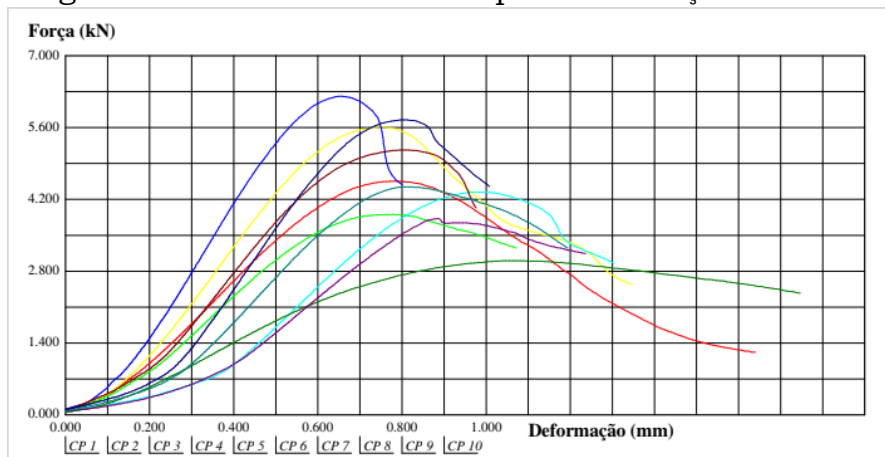


Fonte: Autores, 2019

Comparando se as Figuras 22 e 23, podemos observar que na maior parte dos corpos de prova não houve alteração estrutural significativa, havendo somente a presença de rachaduras.

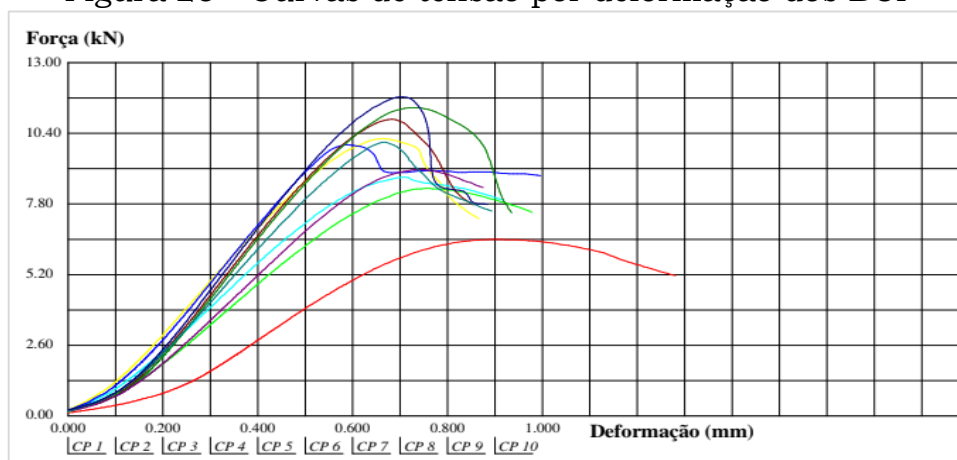
As Figuras 24 e 25 apresentam as curvas de tensão em (kN) por deformação (mm) dos briquetes feitos somente de serragem e dos briquetes feitos de serragem e plástico respectivamente.

Figura 24 - Curvas de tensão por deformação dos BSP



Fonte: Autores, 2019

Figura 25 - Curvas de tensão por deformação dos BCP



Fonte: Autores, 2019

Podemos observar pelas Figuras 24 e 25 que a força máxima suportada pelos os briquetes feitos somente com resíduos de madeira (BSP) foi de 6209 N e para os briquetes produzidos da mistura de serragem e plástico (BCP) esta força foi superior, sendo de 11750 N.

Os briquetes de serragem contendo sacolas plásticas de PEAD apresentaram uma resistência à compressão diametral maior que os briquetes produzidos apenas com resíduos de beneficiamento da madeira. O valor da resistência à compressão diametral dos briquetes foi

encontrado utilizando a norma ABNT NBR 7222 de 2011. Assim, para o BSP este valor foi de 4,92Mpa e para o BCP este valor foi de 9,33 Mpa, conforme o apresentado nas curvas dos corpos de prova.

Devido ao fato das condições do processo de briquetagem, serem as mesmas para os dois tipos de briquetes, um parâmetro que pode explicar o valor de resistência mecânica mais elevado para o BCP, seria a presença de plástico fundido em meio à serragem compactada. Uma vez, que a temperatura de fusão do PEAD é em torno de 130°C, e a temperatura utilizada no processo foi de aproximadamente 200°C, este plástico atuou como uma cola adesiva, prendendo mais partículas de serragem em sua estrutura e isso, proporcionou uma melhor compactação do leito de partículas de serragem, aumentando conseqüentemente sua resistência à compressão.

Considerando uma massa média final dos briquetes BSP e BCP de 20g, foram obtidas as alturas máximas de empilhamento, sendo estas de 29,5m para os briquetes de serragem e 55,9 m para os briquetes de serragem e plástico PEAD. Esta diferença de valores reflete a resistência mecânica dos briquetes. Foi utilizada a referência literária de Silva *et al.* (2015), para o cálculo da altura de empilhamento de briquetes, no qual em seu trabalho com briquetes feitos de serragem de eucalyptus e pinus, Silva *et al.* (2015) encontrou alturas máximas de empilhamento de 87 e 46 m respectivamente.

CAPÍTULO IV

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os briquetes produzidos com a serragem e sacolas plásticas PEAD, se mostraram uma fonte viável para geração de energia e aproveitamento desses resíduos.

Os resultados da análise imediata para caracterização da matéria-prima se encontram dentro dos padrões referenciados na literatura científica para a produção de briquetes, apresentando resultados satisfatórios para o teor de voláteis, teor de cinzas, carbono fixo e densidade a granel.

Através da curva de distribuição granulométrica observou-se que a maior parte dos resíduos de serragem moída apresentou diâmetro médio de 0,74mm.

A serragem apresentou massa específica real de 1533 kg/m^3 , massa a granel de $227,3 \text{ kg/m}^3$ e porosidade de 0,85, apresentando valores próximos ao da literatura.

Durante o processo de produção dos briquetes com aquecimento de 200°C e pressão de 200 kgf/cm^2 , observou-se que ocorreu evaporação da água presente na serragem e perda de resíduos, que fez com que os briquetes de massa inicial de 25g e 26g, apresentassem massa final de 20 e 22 gramas respectivamente.

As análises mostraram que mistura das granulometrias (60,115 e 270 mesh) para a confecção dos briquetes de 35 mesh apresentou resultados bons, não influenciando negativamente na produção e nem nas propriedades dos briquetes.

Os briquetes BSP e BCP apresentaram altura e diâmetro médio aproximadamente iguais, sendo estes de 2,83 cm respectivamente. Os briquetes apresentaram massa específica aparente de $1,1156 \text{ g/cm}^3$ para o BSP e $1,2358 \text{ g/cm}^3$ para o BCP, estes valores estão dentro da faixa da literatura científica. Estes valores contribuíram para o aumento da densidade energética dos briquetes.

A umidade final dos briquetes foi de 5,56% para o BSP e de 1,53 % para o BCP, indicando que houve perda de água durante o processo de

aquecimento e prensagem. Esta umidade contribui para o aumento do poder calorífico, porém, influência negativamente no transporte e armazenamento dos briquetes, pela produção de finos.

O poder calorífico superior dos briquetes contendo plástico foi de 7913,6 kcal/kg, um pouco maior que o PCS dos briquetes contendo somente serragem, que foi de 7688,4 kcal/kg. A densidade energética do BCP apresentou um valor maior de 9,78 Gcal/m³, enquanto para o BSP este valor foi de 8,58 Gcal/m³. O alto poder calorífico encontrado para o BCP, propicia seu uso para a geração de energia.

As curvas de termogravimetria TGA e DrTGA mostraram a degradação térmica dos componentes da serragem, como a celulose, hemicelulose e lignina. Os picos da curva DrTGA, mostraram em que temperatura ocorreu estas perdas de massa de componentes. As curvas de BSP moído e BCP moído se mostraram muito próximas uma da outra, indicando que a quantidade de plástico utilizada não provocou alteração significativa no processo de degradação.

Pelos ensaios de compressão realizados, verificou-se que os briquetes contendo plástico PEAD, obtiveram uma resistência a compressão diametral maior que os briquetes de serragem somente, sendo de 9,33 Mpa para o BCP e de 4,92 Mpa para o BSP.

Estes resultados obtidos demonstram que a utilização destes resíduos combinados, aumenta a quantidade de energia liberada na queima, bem como melhora as características físicas dos briquetes, como a densidade energética e a resistência a compressão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPLAST. **Perfil da Indústria Brasileira de Transformação de Material Plástico**. 2002. Publicação da ABIPLAST: Associação Brasileira da Indústria do Plástico, 2003.

ABRAF- Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. **Anuário Estatístico**.p.150. Brasília, 2012.

ALMEIDA, F. **Responsabilidade social e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2008. 160p.

AL-SALEM, S. M., LETTIERI, P., BAEYENS, J.The valorization of plastic solid waste (PSW) by primary to quaternary routes: From re-use to energy and chemicals. **Progress in Energy and Combustion Science**, n. 36, pp. 103-129, 2010.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Biomassa**. 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: 22 set 2018.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Banco de Informações de Geração**. 2012. Disponível em: www.aneel.gov.br. Acesso em: 22 set 2018.

ANTAL JR., M. J et al. A new technology for manufacturing charcoal from biomass. Energy From Biomass & Wastes, XV **Conference**, Washington, D. C., mar. 1991.

BERGMAN,P.C.A.; KIEL, J.H.A. Torrefaction for biomass upgrading. In: **EUROPEAN BIOMASS CONFERENCE & EXHIBITION**, 14, p. 17-21, 2005.

BEZZON, G. 1994. **Síntese de novos combustíveis sólidos a partir de resíduos agrofloretais e possíveis contribuições no cenário energético brasileiro**. ENGEVISTA, V. 17, n. 1, p. 95-104, Março 2015
104 Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BEENACKERS, A. A. C. M.; BRIDGWATER, A. V. Gasification and pyrolysis of biomass in Europe. In: Pyrolysis and gasification, Londres: **Elsevier Applied Sciences**, Londres, v. 1, p. 129-155, 1989.

BRANCO, C. M.; BUDZIAK, C. R.; PAIXÃO, R. E.; MANGRICH, A. S. **Aproveitamento de resíduo florestal para húmus**. Revista da Madeira, 2005. Disponível em: http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=738&subject=E. Acesso em: 10 Out 2018.

BRAZ, C. E. M. **Caracterização de biomassa lignocelulósica para uso em processos térmicos de geração de energia**. 2014. 115 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Química, 2014.

BRITO, J.O., BARRICHELO, L.E.G; ESALQ-USP; **Aspectos Técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis**; In: 2º Seminário de Abastecimento Energético Industrial com Recursos Florestais; p.101-137; São Paulo; 1982.

CAIRES, R. R. **BRIQUETAGEM DE RESÍDUOS. BIOMASSA**. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. CAMPINAS, 2010.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S. **Sistemas Energéticos em Biomassa**. Amazonas: Imprensa Universitária, 1990.

COUTINHO, F.M.B, I.; MELLO, I.L.;SANTA MARIA, L. C. Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.13,n.1,1-13p, 2003.

COUTO, L.C., SCÁRDUA, F. P., MOTA, M.A., COUTO, T. F. Valor calorífico da madeira úmida. **BiomassaBR**, Curitiba, v.06, n.35, p.4-12, janeiro, 2018.

DEMIRBAS, M. F.; BALAT, M.; BALAT, H. **Potential contribution of biomass to the sustainable energy development**. Energy Conversion and Management. v.50, p.1746–1760, 2009. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890409000946>. Acesso em: 24 set 2018.

EMBRAPA. **Agroenergia, Briquetagem e peletização de resíduos agrícolas e florestais**. Brasília, DF, 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA, 2009). **Biodiesel-Inovação para sustentabilidade**. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/855547>. Acesso em 22 de março de 2012.

FERREIRA, A. T. M. **Efeito do uso plásticos reciclados e óleo de cozinha sobre a qualidade do coque**. Dissertação de pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

FERREIRA, O. C. **Carbon Content In Biomass Fuel**. Economy and Energy, aug./ sept. 2006.

FERNANDES, C. R.; PEREIRA, C. R. **PRODUÇÃO DE BRIQUETE INDUSTRIAL: ENERGIA LIMPA E SUSTENTÁVEL**. In: III Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental Goiânia/GO, 2012.

FOELKEL, C.E.B., BRASIL, M.A.M. e BARRICHELO, L.E.G; **Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas**; IPEF; n.2/3; p.65-74; Piracicaba; 1971.

FONTES, P. J. P. **Auto-Suficiência Energética em Serraria de Pinus e Aproveitamento dos Resíduos**. 1994. 140f. Dissertação (Mestrado do curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1994.

GINÂNI, T. P. **Estudo Preliminar da Produção de Briquetes Compostos a Partir de Resíduos Vegetais**. 37p. Monografia - Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Angicos, RN, 2013.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos Avançados**. São Paulo, v. 21, n. 59, p. 7 - 20, 2007.

GORNI, A. A. **Aproveitamento De Plástico Pós-Consumo Na Forma De Combustível Para Altos-Fornos e Coquearias**. PlastShow 2004, Aranda Eventos, São Paulo SP, 27 a 29 de Abril de 2004.

HILLIG, E. et al. **Resíduos de madeira da indústria madeireira – caracterização e aproveitamento**. In: XXVI ENEGEP. Fortaleza. 2006.

HOFFMAN, B. S. **O ciclo Combinado com Gaseificação Integrada e a Captura de CO₂: Uma Solução para mitigar as emissões de CO₂ em Termelétricas a carvão em larga escala no curto prazo**. 2010. 128p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

HOPEWELL, J., DVORAK, R., KOSIOR, E. Plastics recycling: challenges and opportunities. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, n. 364, pp. 2115-2126, 2009.

IBQP- Instituto Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Paraná. **Análise da competitividade da cadeia produtiva da madeira no estado do Paraná**. Relatório Final. IBPQ Curitiba. 2002. 345 p.

KALT, G.; KRANZL, L. Assessing the economic of bioenergy technologies in climate mitigation and fossil fuel replacement in Austria using a techno-economic approach. *Applied Energy*, v. 88, p.3665-3684, 2011.

LINDENBERG, H.U.; et al. **Rohstoffliches Recycling von Kunststoffen als Reduktionsmittel im Hochofen**. *Stahl und Eisen*, August 1996, p. 89-93.

LORA, E. E. S.; ANDRADE, R. V. Geração de energia e gaseificação de biomassa. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v. 1, n. 3, p. 311-320, 2004.

LOURENÇO, J.B.; TANNOUS, K. **Fluid Dynamic and Mixing Characteristics of Biomass Particles in Fluidized Beds**. In: TANNOUS,

K. Innovative Solutions in Fluid-Particle Systems and Renewable Energy Management. USA, IGI Global, 2015.p. 54-91.

MASSARO, M.M., SON, S.F., GROVEN, L.J. Mechanical, pyrolysis, and combustion characterization of briquetted coal fines with municipal solid waste plastic (MSW) binders. **Fuel**, n. 115. p. 62-69, 2014.

MARCHIORI, Junior. **Aproveitamento de Resíduos de Madeira para Confecção de Briquetes.** Monografia – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2006.

MORO, J. P. Briquetagem de finos de carvão vegetal. In: **Anais** da 2ª jornada de engenharia dos países de língua Portuguesa. Rio de Janeiro. 1987. V.1. p. 1-14.

NOGUEIRA, M. F. M.; RENDEIRO, G. (2008). **Caracterização Energética da Biomassa Vegetal.** BARRETO, Eduardo José Fagundes (Coord). **Combustão e Gaseificação da Biomassa Sólida: Soluções Energéticas para a Amazônia.** Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. p. 52-63.

PERAÇA, M. G.. **AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DE COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS ALTERNATIVOS NA REGIÃO DO PAMPA.** 2018. 79 p. Trabalho de Conclusão de Curso (BACHAREL EM ENGENHARIA QUÍMICA) - UNIPAMPA, BAGÉ, RS, 2018.

PEREIRA, J. C. D. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil.** Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Pará, 2000.

PINCELLI, A. L. P. S. M. **Características dos resíduos da colheita de madeira de eucalipto e pinus, submetidos ao tratamento térmico, com foco na aplicação energética.** 2011. 127 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, ESALQ/ USP, 2011.

PLANETA SUSTENTÁVEL. **As sacolas de plástico devem ser substituídas?** 15 out. 2007. Disponível em: http://planetasustentavel.abril.com.br/noticia/atitude/conteudo_255967.shtml. Acesso em: 26 jul. 2018.

PLASTIC WASTE MANAGEMENT INSTITUTE, (PWMI, 2009). **An Introduction to Plastic Recycling.** Disponível em: http://www.pwmi.or.jp/ei/plastic_recycling_2009.pdf. Acesso em: 22Out2018.

PROTÁSIO, T. P.; ALVES, I. C. N.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; BALIZA, A. E. R. Compactação de biomassa vegetal visando à produção de

biocombustíveis sólidos. **Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo**, v.31, n.68, p.273, 2011. <https://doi.org/10.4336/2011.pfb.31.68.273>

RAAD, T. J.; PINHEIRO, P. C. C.; YOSHIDA, M. I. **Equação geral de mecanismos cinéticos da carbonização do *Eucalyptus* spp.** *Cerne*, Lavras, v. 12, n. 2, p. 93-106, 2006

ROCHA, José Dilcio. Briquetes e pellets de resíduos: tecnologia e potencial 9º Congresso Internacional de Bioenergia. **Embrapa**, São Paulo: 2014.

PLASTICS EUROPE, 2011, *Plastics – the Facts 2011. An analysis of European plastics production, demand and recovery for 2011.* Disponível em: <http://www.plasticseurope.com>. Acesso em: 26 de setembro de 2018.

POZZANA, M. **Consumo de sacos plásticos.** Disponível em: http://www.mundoquente.com.br/artigos/sacos_plasticos.htm. Acesso em 26 set. 2018.

TERRA VIVA- Fertilizantes orgânicos- **Serragem.** Disponível em: <http://www.terravivaorganicos.com.br/pd-4b1cba-serragem-de-madeira-1kg.html>. Acesso em 22 Out 2018.

URNS, S. **Introdução à Combustão:** Conceitos e Aplicações. 3. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. 420 p.

TUOTO, M. **Levantamento sobre a geração de resíduos provenientes da atividade madeireira e proposição de diretrizes para políticas, normas e condutas técnicas para promover o seu uso adequado.** Projeto PNUD BRA 00/20 - Apoio às Políticas Públicas na Área de Gestão e Controle Ambiental. 35p. Curitiba, 2009.

VALE, A. T.; GENTIL, L. V. **Produção e uso energético de biomassa e resíduos agroflorestais.** In: OLIVEIRA, J. T. da S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. (Ed). *Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III.* Jerônimo Monteiro: Suprema, 2008.

VIEIRA, F. C.; REIS, J. V.; OLIVEIRA, M. A.; MACHADO, A. R. T. Raiz do capim vetiver: **uma fonte alternativa para a produção de carvão ativado.** In.: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 2016, v.5, Montes Claros - MG. 2016.

QUIRINO, W. F. **Briquetagem de Resíduos Ligno-celulósicos.** Laboratório de Produtos Florestais – LPF/IBAMA. Brasília, 2004. 10p.

QUIRINO, W. F. - **Compactação de resíduos para use energético.** In: *Ciclo de Seminários "Situação da Lenha no Brasil".* COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 1987. 16 p.

SOBRE OS AUTORES



Maele Costa Dos Santos

Possui Graduação em Engenharia Química pela UNIPAMPA (2019). Possui Especialização em Geração e Uso da Energia pela UNIMAIS (2022). Atualmente é mestranda e pesquisadora do programa de pós-graduação em Ciências Ambientais UFPEL (2023).



Sérgio Meth Morgenbesser

Graduado em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1984). Doutorado em Química Orgânica e Ciência dos Materiais pela Universidade Bar Ilan (2004) em Israel. Pós-doutorado no Scripps Research Institute em San Diego (2004) na área de Síntese Orgânica e Polímeros e no Loker Hydrocarbon Research Institute na Universidade do Sul da Califórnia (USC) em Los Angeles na área de Materiais e Catalise (2005-2009). Atuou como Pesquisador na Loker Hydrocarbon Research Institute (2010). Atualmente é Professor Associado de Engenharia Química no Campus Bagé da Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA.



Tânia Regina de Souza

Possui graduação em Engenharia Química pela Fundação Armando Álvares Penteado (1997), mestrado em Engenharia Química pela Universidade de São Paulo - USP (2003) e doutorado em Engenharia Química pela Universidade de São Paulo -USP (2007). Servidora pública federal desde 2012. Atualmente é professora na Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA. Atua na área de Engenharia Química, com ênfase em aplicações do calor, meio ambiente, tratamento de água e efluentes. Atua também na gestão de projetos de pesquisa, inovação, ensino e extensão.

**Alexandre Denes Arruda**

Possui graduação em Engenharia Química pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS), mestrado e doutorado em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Atuou na área de projetos industriais, como docente na Universidade Luterana do Brasil (ULBRA) e atualmente é docente na Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA). Possui especialização em Gestão de Projetos e Engenharia de Segurança do Trabalho. Tendo interesse nas áreas de Instrumentação, Controle e Gestão de Projetos, Análise de Dados e Segurança de Processos Químicos.

**Thamiris Renata Martiny**

Atualmente é Engenheira Química na Prefeitura de Pinhais, atuando preponderantemente na área de Licenciamento Ambiental. É Pesquisadora/Professora Voluntária na Universidade Federal do Pampa. Doutora em Engenharia Química pela Universidade Federal de Santa Maria. Mestre em Engenharia na área de Fenômenos de Transporte pela Universidade Federal do Pampa. É Engenheira Química e especialista em Docência e Gestão do Ensino Superior.

**Fernanda Rodrigues da Costa**

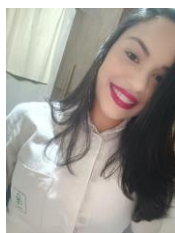
Possui graduação em Engenharia de Energia pela Universidade de Brasília – UnB (2022). Atualmente é mestranda em Planejamento de sistemas energéticos pela Universidade estadual de Campinas – UNICAMP (2023).

**Fabiano da Silva Lopes**

Possui Graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal do Pampa- UNIPAMPA (2019). Atualmente atua como Operador de tratamento de água e efluentes industriais na Veolia.

**Mauricio Henrique Novais Furtado**

Possui graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal do Pampa (2019). Técnico em Agropecuária pelo Instituto Federal de Rondônia, formação em inglês como segunda língua pelo College of the Rockies (Canadá) e atua profissionalmente como Instrutor de Língua Inglesa desde 2020.

**Elizandra Martins Cuppertino**


Possui graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal do Pampa. Pós-graduanda em meio Ambiente e Sustentabilidade pela Faculdade Serra Geral. Atualmente atua na Gestão de Resíduos da Celulose Nipo-Brasileira S/A.

**Cibele Mensch Canabarro**

Possui graduação em Química Licenciatura pela Universidade Federal de Santa Maria (2010) e mestrado em Química pela Universidade Federal de Santa Maria (2015). Atualmente é técnica de laboratório da Universidade Federal do Pampa.

**Anderson Cagliari**

Possui Graduação em Engenharia Química pela UNIPAMPA (2011). Possui Mestrado em Engenharia na área de Fenômenos de Transporte pela UNIPAMPA (2017).



**PRODUÇÃO DE BRIQUETES
A PARTIR DE BIOMASSA FLORESTAL
AGREGANDO RESÍDUOS PLÁSTICOS
PARA COMBUSTÃO**

Home Editora
CNPJ: 39.242.488/0002-80
www.homeeditora.com
contato@homeeditora.com
9198473-5110
Av. Augusto Montenegro, 4120 - Parque
Verde, Belém - PA, 66635-110

