

UNIVERSIDADE DA REGIÃO DE JOINVILLE – UNIVILLE  
MESTRADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

**AVALIAÇÃO DO APROVEITAMENTO DE FOLHAS RESSECADAS DE  
BANANEIRA NA PRODUÇÃO DE BRIQUETES POR EXTRUSÃO**

FLÁVIO DE BORBA PRÁ

JOINVILLE  
2016

FLÁVIO DE BORBA PRÁ

**AVALIAÇÃO DO APROVEITAMENTO DE FOLHAS RESSECADAS DE  
BANANEIRA NA PRODUÇÃO DE BRIQUETES POR EXTRUSÃO**

Dissertação apresentada como requisito para  
obtenção do título de Mestre em Engenharia de  
Processos, na Universidade da Região de  
Joinville - UNIVILLE.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup>. Dra. Noeli Sellin.

Coorientadora: Prof.<sup>a</sup>. Dra. Cintia Marangoni.

**JOINVILLE**

**2016**

Catálogo na publicação pela Biblioteca Universitária da Univille

P895a Prá, Flávio de Borba  
Avaliação do aproveitamento de folhas ressecadas de bananeira na produção de briquetes por extrusão / Flávio de Borba Prá; orientadora Dra. Noeli Sellin, coorientadora Dra. Cintia Marangoni – Joinville: UNIVILLE, 2016.

83 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos  
– Universidade da Região de Joinville)

1. Bananicultura. 2. Biomassa. 3. Energia da biomassa. 4. Resíduos como combustível. I. Sellin, Noeli (orient.). II. Marangoni, Cintia (coorient.). III. Título.

CDD 662.88

# Termo de Aprovação

## “Avaliação do Aproveitamento de Folhas Ressecadas de Bananeira na Produção de Briqueletes por Extrusão”

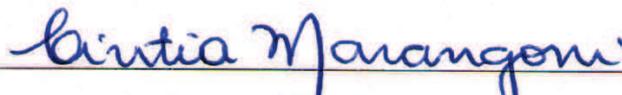
por

Flávio de Borba Prá

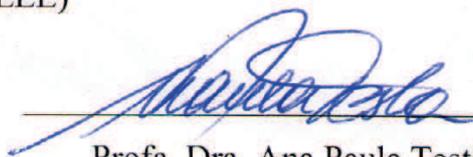
Dissertação julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos, área de concentração Engenharia de Processos e Tecnologias Limpas e aprovada em sua forma final pelo Programa de Mestrado em Engenharia de Processos.



Profa. Dra. Noeli Sellin  
Orientadora (UNIVILLE)



Profa. Dra. Cintia Marangoni  
Coorientadora (UNIVILLE)

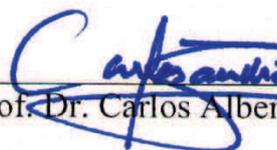


Profa. Dra. Ana Paula Testa Pezzin  
Coordenadora do Programa de Mestrado em Engenharia de Processos (UNIVILLE)

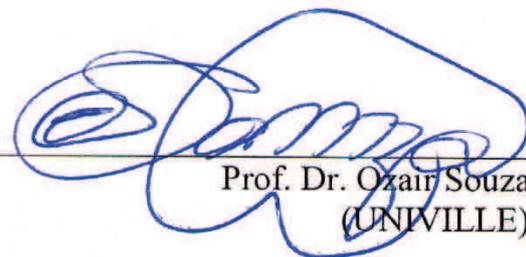
### Banca Examinadora:



Profa. Dra. Noeli Sellin  
Orientadora (UNIVILLE)



Prof. Dr. Carlos Alberto Klimeck Gouvêa  
(UNISOCIESC)



Prof. Dr. Ozair Souza  
(UNIVILLE)

Joinville, 31 de março de 2016.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a minha esposa Fabiola, que sempre me incentivou frente às dificuldades.

Aos meus pais Maria Eli e Pedro por seus bons ensinamentos, apoio mesmo à distância e por sempre acreditarem em mim.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha orientadora Prof.<sup>a</sup>. Dra. Noeli Sellin, pela paciência e amizade, pela orientação e ensinamentos.

Aos meus amigos Jardel Machado e Deivi Silva pela ajuda e incentivo na realização deste trabalho.

À Cristiano Sapelini, pelo valioso auxílio nos laboratórios e a parceria na realização dos experimentos.

Aos bolsistas da UNIVILLE, pelo auxílio nos laboratórios.

Às empresas Bioware Desenvolvimento de Tecnologia de Energia e Meio Ambiente Ltda. e a Ecodevices, pelo apoio na realização dos testes de briquetagem e torrefação.

À Juan Miguel Mesa-Pérez, Felix Felfli e toda equipe da Bioware e Ecodevices pelo suporte no desenvolvimento do trabalho.

À UNIVILLE, ao corpo docente do Mestrado em Engenharia de Processos, pelo conhecimento e amizade adquiridos durante o curso, e aos funcionários que sempre estiveram disponíveis e acessíveis.

A todas as pessoas que de uma forma direta ou indireta contribuíram para realização deste trabalho, os meus sinceros agradecimentos.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	8
LISTA DE TABELAS .....	10
RESUMO.....	11
ABSTRACT .....	12
INTRODUÇÃO .....	13
1 OBJETIVOS.....	16
1.1 Objetivo Geral.....	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 A cultura da Banana .....	17
2.1.1 Resíduos gerados na bananicultura .....	17
2.2 Uso de biomassa como combustível .....	19
2.3 Briquetagem de biomassa .....	20
2.3.1 Fatores que afetam a briquetagem da biomassa.....	21
2.3.1.1 Tamanho das Partículas.....	21
2.3.1.2 Teor de Umidade .....	22
2.3.1.3 Densidade .....	23
2.3.1.4 Materiais voláteis.....	24
2.3.1.5 Temperatura .....	24
2.3.1.6 Pressão .....	25
2.4 Equipamentos utilizados para produção de briquetes .....	25
2.4.1 Prensa de pistão mecânico e hidráulico .....	25
2.4.2 Prensa de rolos.....	26
2.4.3 Prensa de parafuso sem fim (extrusora).....	28

2.4.3.1 Prensa com parafuso cônico .....	29
2.4.3.2 Prensa com parafuso cilíndrico e matriz aquecida .....	30
2.4.3.3 Prensa de parafusos gêmeos .....	32
2.5 Torrefação de biomassa .....	32
3 METODOLOGIA .....	36
3.1 Obtenção e preparação da biomassa .....	36
3.2 Caracterização das folhas de bananeira.....	38
3.2.1 Análise química aproximada.....	38
3.2.2 Análise química elementar.....	39
3.2.3 Poder calorífico .....	40
3.2.4 Análises térmicas.....	41
3.3 Torrefação das amostras de folhas de bananeira.....	41
3.4 Avaliação das propriedades visco-elásticas das folhas de bananeira .....	42
3.5 Briquetagem.....	48
3.6 Determinação da densidade energética e aparente .....	50
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	51
4.1 Análise química aproximada das folhas de bananeira não torrificada e torrificadas.....	51
4.2 Análise química elementar e poder calorífico das folhas de bananeira não torrificada e torrificadas .....	53
4.3 Comportamento térmico.....	55
4.4 Compactação, propriedades visco-elásticas e briquetagem das partículas de folhas de bananeira ressecadas.....	58
4.5 Compactação e propriedades visco-elásticas das partículas de folhas de bananeira torrificadas.....	66
4.6 Análise da densidade aparente e energética das folhas de bananeira e dos briquetes.....	70

CONCLUSÃO.....	72
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	74
ANEXO I.....	82
ANEXO II.....	83

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Biomassa para produção de briquetes.....	21
Figura 2: (a) Prensa de pistão mecânico e (b) pistão hidráulico.....	26
Figura 3: (a) Prensa de rolos e (b) detalhe dos rolos. ....	27
Figura 4: (a) Prensa de parafuso cônico e (b) detalhe da prensa de parafuso cônico.....	29
Figura 5: (a) Prensa de parafuso com matriz aquecida e (b) detalhe da prensa de parafuso cilíndrico e matriz aquecida. ....	30
Figura 6: Dispositivo de extrusão (Parafuso de alimentação e Matriz).....	31
Figura 7: Briquetes de prensa de parafuso com matriz de seção circular.....	31
Figura 8: Prensa de parafusos gêmeos. ....	32
Figura 9: Esquema de variação das propriedades da biomassa submetidas a torrefação. ....	33
Figura 10: Folhas de bananeira ressecadas coletadas. ....	36
Figura 11: Triturador forrageiro DPM-4. ....	37
Figura 12: Folhas de bananeira trituradas em diferentes granulometrias: a) peneira de 10 mm e b) peneira de 5 mm. ....	37
Figura 13: Análises realizadas nas amostras de folhas de bananeira.....	38
Figura 14: Reator para torrefação de biomassa. ....	41
Figura 15: Amostras de folhas de bananeira não torrificada e torrificadas.....	42
Figura 16: Dispositivo de ensaio de compactação com controle de temperatura. ....	43
Figura 17: Exemplo de ajuste do modelo. ....	47
Figura 18: Exemplo da curva para determinação da energia de compactação.....	48
Figura 19: Prensa extrusora briquetadeira BIOTOR-GII. ....	49

Figura 20: Matriz e cilindro de saída utilizado para a produção de briquetes na extrusora. ....	49
Figura 21: TGA/DTG das amostras de folha de bananeira. ....	55
Figura 22: DTA das amostras de folha de bananeira. ....	57
Figura 23: Efeito da temperatura na curva de compactação das folhas de bananeira. ....	61
Figura 24: Resultado da produção briquetes de folhas de bananeira com granulometria maior que 3,50 mm em extrusora empregando matriz com ângulo de 8°. ....	62
Figura 25: Briquetes produzidos durante o ensaio de compactação com diferentes granulometrias de folha de bananeira. ....	63
Figura 26: Produção dos briquetes de folhas de bananeira em extrusora empregando matriz com ângulo de entrada de 8°. ....	65
Figura 27: Briquetes de folhas de bananeira com granulometria menor que 1,70 mm produzidos em extrusora empregando matriz com ângulo de 8°. ....	65
Figura 28: Briquetes produzidos com biomassa torrificada durante ensaio de compactação. ....	68
Figura 29: Carvão formado durante a torrefação com temperaturas de 250 e 280 °C. ....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estimativa da geração de resíduos da bananicultura em Santa Catarina em 2015. ....	18
Tabela 2: Variáveis do processo de compactação. ....	44
Tabela 3: Análise química aproximada das folhas de bananeira não torrificada e torrificadas. ....	51
Tabela 4: Análise química elementar e poder calorífico superior das folhas de bananeira não torrificada e torrificadas. ....	53
Tabela 5: Propriedades visco-elásticas das folhas de bananeira não torrificadas com granulometria maior que 3,50 mm. ....	58
Tabela 6: Energia de compactação das partículas de folhas de bananeira com granulometria maior que 3,50 mm. ....	60
Tabela 7: Propriedades visco-elásticas das folhas de bananeira não torrificada com granulometria menor que 1,70 mm. ....	63
Tabela 8: Energia de compactação das partículas de folhas de bananeira com granulometria menor que 1,70 mm. ....	64
Tabela 9: Propriedades visco-elásticas das folhas de bananeira torrificadas com granulometria menor que 1,70 mm. ....	66
Tabela 10: Energia de compactação e taxa de compressão para as folhas de bananeira torrificadas. ....	69
Tabela 11: Densidade aparente e energética das folhas de bananeira. ....	70
Tabela 12: Densidade aparente e energética dos briquetes. ....	71

## RESUMO

Uma forma de aproveitar biomassa vegetal como fonte de energia é transformá-la em briquete a partir de sua compactação. Desta forma, visando a produção de briquetes em extrusora briquetadeira, resíduos da bananicultura (folhas ressecadas) foram caracterizados por análises química aproximada e elementar (C, H, N, S e O), poder calorífico, comportamento térmico por análise termogravimétrica (TGA/DTG) e análise termogravimétrica derivativa (DTA), densidades aparente e energética. As propriedades visco-elásticas das folhas sob diferentes temperaturas (30 e 120 °C) e pressões de compactação (20, 40 e 60 MPa) foram avaliadas empregando um dispositivo de compactação das amostras acoplado a uma máquina universal de ensaios mecânicos. Briquetes de folhas ressecadas e trituradas com duas faixas de tamanho médio de partículas foram produzidos em extrusora briquetadeira com matriz aquecida com diferentes ângulos. Porém, houve problemas na compactação e os briquetes formados na extrusora briquetadeira apresentaram baixa resistência mecânica com produção descontinuada. Em função disto, foi realizada a torrefação da biomassa em diferentes temperaturas (220, 250 e 280 °C) e avaliadas suas características químicas e térmicas e propriedades visco-elásticas, as quais foram comparadas com as das amostras não torrificadas. Com a torrefação, houve incremento no teor de carbono fixo entre 15,7 e 87,1 %, redução no teor de materiais voláteis entre 4,8 e 30,1 % e aumento no teor de cinzas entre 11,5 e 73,8 % para ambos os resíduos torrificados. Os resíduos torrificados apresentaram maiores valores de densidade energética, crítica e final, além do aumento do poder calorífico em torno de 19,0 a 20,7 MJ/kg. Dentro das condições operacionais avaliadas, a torrefação a 220 °C foi a que ocasionou melhores resultados para a produção de briquetes em extrusora briquetadeira.

Palavras-chave: *bananicultura, briquetagem, propriedades visco-elásticas, torrefação.*

## ABSTRACT

One of the available ways to use of biomass as an energy source is to turn it into briquettes using a compression method. Therefore, in order to produce briquettes in briquette extruder (screw press), banana wastes (dried leaves) were characterized by proximate and elemental analysis (CHNS and O), heating value, thermal behavior by thermogravimetric analysis (TGA/DTG) and differential thermal analysis (DTA), apparent and energy densities. The visco-elastic properties from the leaves were measured at different temperatures (30 and 120 °C) and compression pressures (20, 40 and 60 MPa) using a compression device coupled to the universal testing machine. Briquettes of dried leaves with two ranges of particles medium size were produced in a briquette extruder using a heated die with different angles. However, there were issues during the compression process, and the briquettes formed had low mechanical strength with discontinued production. Due to that, biomass torrefied was performed under different temperatures (220, 250 and 280 °C) and then evaluated some specific characteristics, such as chemical and thermal and visco-elastic properties, which were compared with the ones from the non torrefied samples. Using the torrefaction procedure, there was an increased in fixed carbon content, between 15,7 and 87,1 %, reduction in volatile matter content, between 4,8 and 30,1 % and increased in ash content, between 11,5 and 73,8 %, for both residues. The torrefaction process showed improvements in energy, critical and final densities and an increase in the high heating value, between 19,0 to 20,7 MJ/kg. Within the evaluated operational conditions, the torrefaction at 220 °C was the process that led to best results for briquettes production when using a briquette extruder.

Keywords: banana waste, briquetting, visco-elastic properties, torrefaction.

## INTRODUÇÃO

A biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos, e é considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e a consequente redução da dependência dos combustíveis fósseis (MAIA, 2013).

Dentre as formas para melhor utilizar estes resíduos, está o método de densificação (compactação, aglomeração ou adensamento) que proporciona uma série de vantagens, quando comparado a sua utilização no estado natural, principalmente no tocante ao armazenamento, manuseio, aumento da densidade e poder calorífico (SOUZA, 2014).

A região Sul do Brasil é uma grande produtora de banana, com participação de 15,7% da produção nacional. O estado de Santa Catarina apresenta o maior percentual dessa produção, com 9,8%, com destaque para o Litoral Norte, com 85% da produção estadual (CEPA, 2016).

Segundo dados de uma empresa de alimentos do município de Garuva-SC, para cada tonelada de banana colhida, são gerados, aproximadamente 480 kg de folhas de bananeira. Após a colheita, as folhas normalmente são deixadas no solo para servirem como adubo ou como cobertura de solo. O aproveitamento desse resíduo na produção de insumo, permite agregar valor à cultura da banana, que tem enfrentado nos últimos anos grandes desafios gerados pela oscilação do preço do produto no mercado nacional (FERNANDES, 2012; MAIA, 2013 e KROHL, 2014).

Vários estudos utilizando diferentes técnicas para a produção de energia a partir de biomassas vêm sendo apresentados: Federizzi (2008) utilizou resíduos da bananicultura e pelo processo de metanização obteve biogás; Souza *et al.* (2010) realizou hidrólise de banana, sua polpa e cascas, para geração de bioetanol; Fernandes (2012) realizou a pirólise lenta dos resíduos gerados na bananicultura (folhas e pseudocaule) demonstrando a viabilidade no uso desses resíduos, os quais podem ser aproveitados em diversas aplicações, como combustível na geração de energia e insumos químicos; Krohl (2014) avaliou a pirólise rápida das folhas de bananeira ressecadas visando obtenção de maiores rendimentos em bio-óleo.

Segundo Felfli (2003), existem alguns fatores que dificultam a utilização direta da biomassa como combustível, como baixa densidade aparente, alta umidade, baixo poder calorífico, volume muito grande para o transporte, além do alto índice de perdas na armazenagem, pois quando são estocados por um período muito longo, podem ocorrer processos de fermentação e decomposição, inutilizando o material.

De acordo com Oliveira (2011) e Bhattacharya *et al.* (1989), pode-se reaproveitar resíduos lignocelulósicos (serragem, casca de arroz, palha de milho, sabugo, bagaço de cana, etc.) compactando-os, visando obter briquetes com qualidade superior a qualquer lenha empregada como combustível em fornos e caldeiras. A compactação é uma alternativa não somente para aproveitar resíduos como para facilitar o transporte destes para aplicações em lugares distantes da fonte. Existem diversas configurações de briquetadeiras para compactação de biomassa, como a extrusora briquetadeira (prensa de parafuso), prensa hidráulica e de pistão (FILLIPETO, 2008). A briquetagem é uma forma bastante eficiente para concentrar a energia disponível da biomassa. Um m<sup>3</sup> de briquetes contém pelo menos cinco vezes mais energia que um m<sup>3</sup> de resíduos não compactados. Essa afirmação leva em consideração a densidade e o poder calorífico médio desses materiais (MORAIS *et al.*, 2006).

Para melhorar a briquetagem e a qualidade dos briquetes produzidos, a torrefação torna-se um processo interessante, no qual a biomassa é tratada a temperaturas entre 200 e 300 °C, eliminando-se a umidade e algumas frações de voláteis. Além da possibilidade da melhoria nas propriedades energéticas, espera-se, ainda, que o produto da torrefação da biomassa seja mais fragmentável, devido à redução de sua resistência mecânica melhorando a aglomeração das partículas. Com a torrefação, ocorre o aumento do poder calorífico, em geral, pelo aumento da concentração de carbono, em relação a biomassa sem torreficar (SANTOS, 2012 e FELFLI, 2003).

Em estudo realizado por Maia (2013), foi avaliado o aproveitamento de resíduos da rizicultura e bananicultura (folhas e pseudocaule) na produção de briquetes em prensa hidráulica com pressão de compactação de 18 MPa sob dois tempos de compactação. Os resíduos apresentaram altos teores de materiais voláteis e carbono e umidade adequada para briquetagem, entre 8 e 15%. Sob combustão, os resíduos e os briquetes apresentaram liberação de

energia em temperaturas máximas de 580 e 350 °C, respectivamente. A casca de arroz e o seu briquete apresentaram menor liberação de energia que os demais resíduos. O Poder Calorífico Superior (PCS) dos resíduos foi em torno de 15 a 17 MJ/kg. Após a briquetagem, houve aumento do PCS para a casca de arroz, enquanto que para os resíduos da bananicultura, os valores variaram pouco. Os valores da densidade energética aumentaram de forma significativa após a compactação dos resíduos, ficando em torno de 14,7 a 17,5 MJ/m<sup>3</sup>.

Dentre os três resíduos estudados, as folhas de bananeira foram as que apresentaram maior potencial para serem empregadas na geração de energia na forma de briquetes, pois apresentaram boas características térmicas e físicas, com destaque para o PCS da ordem de 17,7 MJ/kg e densidade energética de 17,5 MJ/m<sup>3</sup> e a melhor combustibilidade.

Visando ampliar esses estudos e avaliar a influência do tamanho das partículas e da torrefação, neste trabalho, folhas de bananeira ressecadas e torreficadas foram caracterizadas e suas propriedades físicas, químicas, térmicas e visco-elásticas (sob diferentes pressões e temperaturas) foram analisadas objetivando a produção de briquetes em extrusora briquetadeira. A extrusora briquetadeira apresenta vantagens em relação à prensa hidráulica que permite melhor amolecimento da lignina contida nas células da biomassa produzindo briquetes mais compactos e com elevada resistência mecânica facilitando o manuseio e transporte. O processo de torrefação melhora o poder calorífico, a densidade energética e propriedades tais como durabilidade, homogeneidade e comportamento hidrofóbico do briquete produzido.

# **1 OBJETIVOS**

## **1.1 Objetivo Geral**

Avaliar a influência das características físicas, químicas e térmicas e as propriedades visco-elásticas de folhas ressecadas e folhas torrificadas de bananeira para a produção de briquetes em extrusora briquetadeira com matriz aquecida.

## **1.2 Objetivos Específicos**

1. Determinar as características físicas, químicas e térmicas das folhas ressecadas de bananeira para uso como briquetes;
2. Determinar as propriedades visco-elásticas das folhas ressecadas de bananeira trituradas em duas faixas de tamanho médio de partículas;
3. Avaliar a influência da pressão e da temperatura no processo de compactação;
4. Produzir briquetes das folhas ressecadas de bananeira em extrusora briquetadeira sob diferentes condições e avaliar sua qualidade;
5. Submeter as folhas de bananeira ao processo de torrefação sob diferentes temperaturas e estabelecer as diferenças nas propriedades da biomassa em comparação a biomassa não torrificada.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 A cultura da Banana**

Segundo Soares *et al.* (2014), o cultivo de banana é uma das principais atividades no mundo do agronegócio, com plantações em mais de 120 países tropicais e subtropicais. Além de ser uma fonte de alimento vital, a banana é a fruta mais popular do mundo, e sua produção ocorre em praticamente todos os países em desenvolvimento. A banana ocupa a segunda posição na produção mundial de frutas e juntamente com o arroz, o trigo e o milho são consideradas como as fontes alimentares mais importantes do mundo (PERRIER *et al.*, 2011).

Segundo dados do IBGE (2015), no ano de 2014, a produção de bananas no Brasil foi de 7,1 milhões de toneladas em uma área plantada de 523 mil hectares. A produção brasileira está distribuída por todo o território nacional, sendo a região Nordeste a maior produtora (34,4 %), seguida do Sudeste (31,8 %), Sul (15,7 %), Norte (14%) e Centro-Oeste (4 %). A produção na região Sul está dividida da seguinte forma: Santa Catarina, com 9,8 %, Paraná, com 4 % e o Rio Grande do Sul, com 1,9 %.

As maiores produções de banana do Estado de Santa Catarina estão no Litoral Norte, com 85 % e no Sul, com 9 %. Dez municípios respondem por mais de 80% da produção estadual, sendo nove do Litoral Norte: o município de Corupá participa com 24 %, seguido de Luiz Alves, com 18,4 %, Massaranduba, com 8,2 %, Jaraguá do Sul, com 6,9 %, São João do Itaperiú, com 5,4 %, Schroeder, com 4,6 %, Garuva, com 3,8 %, Guaramirim, com 3,7 %, Joinville, com 3 % e apenas Jacinto Machado, com 3,3 % do Litoral Sul (CEPA, 2016).

#### **2.1.1 Resíduos gerados na bananicultura**

Para cada tonelada de banana industrializada aproximadamente 3 toneladas de pseudocaule, 160 kg de engaços, 480 kg de folhas e 440 kg de cascas são gerados (Souza *et al.*, 2010). A partir destes dados é possível estimar

a geração de biomassa no estado de Santa Catarina, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Estimativa da geração de resíduos da bananicultura em Santa Catarina em 2015.

Produção Total de Banana Safra 2015 (Toneladas)	Resíduos	Produção de Resíduos Safra 2015 (Toneladas)
706.896	Pseudocaule	2.120.688
	Engaço	113.103
	Folhas	339.310
	Cascas	311.034

A avaliação da potencialidade de resíduos da bananicultura como biomassa para geração de energia está presente em diferentes estudos. Souza *et al.* (2010) e Federizzi (2008) estudaram a obtenção de biogás utilizando o pseudocaule, folha, casca e engaço de bananeira. Schulz (2010) e Hopfner (2015) utilizaram cascas e polpa de banana para produção de etanol. Em estudos realizados por Fernandes (2012) e Krohl (2014), pseudocaule e folhas ressecadas de bananeira foram caracterizados e submetidos aos processos de pirólise lenta e rápida, visando sua valorização a partir da geração de produtos combustíveis, insumos químicos e bio-óleo. Maia (2013) avaliou o potencial de aproveitamento das folhas ressecadas e pseudocaule da bananeira para a produção de briquetes utilizando prensa hidráulica. Bello *et al.* (2014) avaliou a separação do etanol produzido a partir de resíduos de banana (fruta rejeitada) usando pervaporação com diferentes condições de operação. Gabhane *et al.* (2014) estudou a eficácia do pré-tratamento ácido e alcalino juntamente com o tratamento em autoclave, o aquecimento por microondas e ultra-sons em diferentes partes morfológicas da bananeira e a redução de açúcares para a produção de bioetanol. Naranjo *et al.* (2014) investigaram a produção integrada de PHB (polihidroxibutirato) e etanol a partir de resíduos de banana. A produção de PHB foi realizada utilizando a glicose obtida na fase de hidrólise a partir da polpa da banana, enquanto as cascas foram exploradas para a produção de etanol. Housagul *et al.* (2014) estudaram o co-digestão da casca

de banana e resíduos de glicerol para a produção de biometano. Os resultados mostraram que o rendimento e o potencial máximo de produção de metano foi com a mistura de 7,5 % de casca de banana e 7,5 g/L de resíduos de glicerol.

## **2.2 Uso de biomassa como combustível**

Segundo Tumuluru *et al.* (2011), os combustíveis de madeira, palhas agrícolas e ervas são as fontes de energia de biomassa mais proeminentes. Os resíduos gerados nas operações com madeira ou de agro processamento são as fontes de biomassa mais baratas, porém sua oferta é mais limitada. Para superar essa limitação, os países ao redor do mundo estão considerando todas as culturas de biomassa para fins energéticos e começaram a desenvolver tecnologias para utilizar esses materiais de forma mais eficiente.

A utilização de resíduos vegetais (galhos, casca de arroz e café, bagaço, serragem, etc.) como combustível representa uma interessante alternativa aos combustíveis sólidos tradicionais (lenha e carvão). Bagaço da cana, casca de arroz e de coco, restos de madeira são exemplos de combustíveis que têm sido usados, tanto secos ou na forma de briquetes, na produção de vapor nas caldeiras das empresas, em substituição aos combustíveis de origem fóssil, como óleo e gás natural (ROCHA *et al.*, 2009).

O modo mais fácil e simples de utilizar o poder calorífico destes materiais é a combustão direta. Esta prática apresenta algumas desvantagens, pois os resíduos vegetais possuem baixa densidade e muitos deles se encontram em forma de pó, provocando emissão de particulados, tornando difícil e caro o manuseio, o transporte, o armazenamento e seu uso como combustível.

A partir da biomassa podem ser produzidos combustíveis sólidos, líquidos e gasosos. Para a transformação da biomassa em energia, e conseqüentemente em combustíveis, são necessárias tecnologias de conversão termoquímicas, destacando-se a combustão, a pirólise, a liquefação e a gaseificação. A partir dessas transformações, são gerados produtos como o bio-óleo, gás, calor ou carvão (FERNANDES, 2012).

### 2.3 Briquetagem de biomassa

A compactação dos resíduos em relação a sua combustão quando estão na forma de partículas é uma opção promissora para superar as desvantagens citadas anteriormente. Os processos convencionais para a compactação de biomassa podem ser classificados em enfardamento, peletização e briquetagem, que são realizados usando um enfardador, prensa peletizadora, prensa de rosca (extrusora), de êmbolo ou uma prensa de rolos a fim de ajudar a superar os problemas de alimentação, armazenamento, manuseio e transporte. Briquetagem e peletização são os processos mais comuns para a compactação da biomassa para uso como combustível sólido. Para produção de briquetes, deve-se aplicar pressão mecânica para reduzir o volume de matéria vegetal e promover conversão para a forma sólida, com objetivo de torná-las um sólido geométrico, compacto e com alta densidade. Durante a compactação, a biomassa é comprimida mecanicamente, aumentando a sua densidade cerca de dez vezes (TUMULURU *et al.* 2011, FILLIPETO, 2008).

O processo de briquetagem, geralmente, começa com a coleta dos resíduos, seguido da secagem, redução de tamanho e compactação por extrusão ou prensa. A briquetagem pode ser realizada com ou sem um aglomerante de partículas (OLADEJI, 2015).

Conforme Bhattacharya (2002), briquetes são de tamanho relativamente grande (tipicamente, 5-6 cm de diâmetro e 30-40 cm de comprimento).

As matérias-primas para a briquetagem estão prontamente disponíveis em todo o mundo. O processo de briquetagem ajuda a reduzir o desmatamento, fornecendo um substituto para a madeira usada como combustível. Os briquetes são uniformes em tamanho sendo ideal para a combustão completa e tem alta eficiência de queima (KATHURIA e GROVER, 2012; OLADEJI, 2015).

Segundo Kathuria e Grover (2012), há algumas desvantagens na briquetagem de biomassa, como custo de investimento e consumo de energia elevado, os quais dependem das características da biomassa e do tipo de equipamento empregado.

Na Figura 1 são mostrados alguns tipos de biomassa que podem ser utilizadas para a produção de briquetes.



Figura 1: Biomassa para produção de briquetes.

Fonte: Autor (2016)

### 2.3.1 Fatores que afetam a briquetagem da biomassa

Afim de produzir briquetes de qualidade, a preparação da biomassa é muito importante. Existe um grande número de variáveis que afetam a produção e a qualidade dos briquetes a partir de biomassa. Alguns, são referentes à matéria-prima utilizada, como tamanho da partícula, teor de umidade, densidade e materiais voláteis e outros referentes ao processo de briquetagem como temperatura e pressão de trabalho (OBERNBERGER e THEK, 2004).

#### 2.3.1.1 Tamanho das Partículas

O tamanho e a forma das partículas são de grande importância para a compactação. Geralmente, a partícula de biomassa com 6-8 mm de tamanho origina os melhores resultados de compactação. O tamanho das partículas influencia na durabilidade e resistência dos briquetes, evidenciando a importância da classificação granulométrica da biomassa antes da compactação, sendo que menores partículas facilitam a união das mesmas, diminuindo os

espaços vazios entre as partículas maiores e proporcionando briquetes com maior densidade (KALIYAN e MOREY, 2009, CASTELLANO *et al.* 2015).

No caso de se empregar extrusora de parafuso para a produção dos briquetes, na qual a biomassa é submetida à alta pressão, partículas de grandes dimensões, podem ocasionar o entupimento na entrada da matriz. Essas partículas, que não são transportadas através do parafuso acumulam no ponto de entrada e a evaporação da umidade devido à alta temperatura gerada pela rotação do parafuso e pelo calor conduzido a partir da matriz aquecida condensam, resultando na formação de “caroços” levando ao trancamento do parafuso (GILBERT *et al.*, 2009; OLADEJI, 2015).

Alguns resíduos utilizados para a produção de briquetes já se apresentam na forma de partículas pequenas, tais como, serragem, bagaço de cana, casca de café e casca de arroz e podem ser usados diretamente na alimentação do processo de briquetagem. No entanto, biomassas como pseudocaule e folhas de bananeira, pimenta longa, girassol, palha de cana, por exemplo, devem ser trituradas antes da briquetagem.

Em estudo realizado por Faizal *et al.* (2015) com resíduos de cacho de palmeira sem fruto, foram produzidos briquetes utilizando uma prensa de ensaio de materiais. Três diferentes tamanhos de partículas foram testadas no estudo: menores que 0,3 mm (partícula pequena), entre 0,5 e 1,0 mm (partícula média) e entre 1,0 e 3,9 mm (partícula grande). O processo de briquetagem foi realizado com temperaturas de 150, 170, 190 e 210 °C com pressão constante de 7 MPa. Os resultados obtidos indicaram que, para a mesma temperatura de aquecimento, a resistência mecânica do briquete aumentou quando as partículas pequenas foram utilizadas. Para temperatura de 210 °C, a resistência mecânica do briquete produzido foi de 10, 9 e 7 MPa para partículas pequena, média e grande, respectivamente.

### **2.3.1.2 Teor de Umidade**

O teor de umidade do material é um parâmetro importante para a briquetagem. Em geral, quando o teor de umidade da biomassa alimentada é de

10 a 12%, os briquetes produzidos terão de 8 a 10% de umidade (GROVER e MISHRA, 1996).

O excesso de umidade pode provocar explosões, devido à formação de vapor, no entanto, resíduos muito secos dificultam o processo de aglomeração das partículas. A quantidade certa de umidade desenvolve propriedades de auto-ligação em substâncias lignocelulósicas em elevadas temperaturas e pressões em máquinas briquetadeiras, favorecendo a compactação (MAIA, 2013; OLADEJI, 2015).

Em estudo realizado por Matúš *et al.*, (2015) com serragem de Abeto Vermelho, foram produzidos briquetes em prensa hidráulica utilizando nove amostras com diferentes teores de umidade e a densidade do briquete e a qualidade superficial foi avaliada. Os valores do teor de umidade inicial das amostras medida antes do processo de compactação foram de 7,4; 9,1; 10,3; 11,7; 12,6; 14,5; 16,5; 19,6 e 22,0 %. A melhor qualidade superficial (ausência de rachaduras e porosidade), maior valor de densidade dos briquetes (950 kg/m<sup>3</sup>) e maior resistência mecânica (27,4 MPa), foram alcançados utilizando resíduos com o teor de umidade de 12,6 %.

### **2.3.1.3 Densidade**

A densidade é um importante índice de qualidade dos briquetes porque relaciona-se com o armazenamento e o transporte, ou seja, quanto maior a densidade dos briquetes, menor o volume ocupado pela mesma quantidade de massa (OBERNBERGER e THEK, 2010).

Em estudo realizado por Tumuluru *et al.* (2014), briquetes utilizando resíduos de palha de cevada, trigo, canola e aveia foram produzidos em uma prensa hidráulica de laboratório. A densidade aparente destas amostras estavam entre 36 a 67, 37 a 58, 48 a 58, e 40 a 58 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Após o processo de briquetagem, os valores médios da densidade aparente foram de 591,4, 654,4, 539,6, 549,5 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente, aumentando cerca de 8 a 12 vezes o valor da densidade aparente antes do processo de briquetagem.

#### 2.3.1.4 Materiais voláteis

Segundo Tavares e Santos (2013), o percentual de materiais voláteis representa e/ou expressa a facilidade com que o material e o carbono fixo queimam em um determinado período de tempo.

Durante o processo de combustão, ocorre grande emissão de gases, devido à quebra de ligações químicas e oxidação das frações lignocelulósicas da biomassa vegetal.

#### 2.3.1.5 Temperatura

A temperatura é um dos parâmetros que mais influenciam no processo de briquetagem nas propriedades do produto compactado. A resistência do briquete depende da temperatura de compactação e a resistência máxima é alcançada com temperaturas em torno de 220 °C (QUIRINO *et al.*, 2012).

A compactação em condições acima de 100 °C permite o amolecimento da lignina contida nas células da biomassa, a qual age como um aglutinante entre as partículas, dispensando, assim, o uso de ligantes adicionais na biomassa, como é comum nas técnicas de compactação fria de baixa pressão. Além disso, temperaturas elevadas evaporam parte da umidade da biomassa, melhorando o poder calorífico do produto compactado. As altas temperaturas para o processo de compactação resultam numa maior durabilidade do briquete, em comparação à temperatura ambiente (WONGSIRIAMNUAY e TIPPAYAWONG, 2015; LARSSON *et al.*, 2013; FILIPPETTO, 2008).

Em estudo realizado por Wongsiriamnuay e Tippayawong (2015), pellets de espiga, palha e talo de milho foram produzidos utilizando um dispositivo especialmente desenvolvido acoplado à uma máquina de ensaio universal com temperaturas de 30 e 80 °C com pressões de 150 e 250 MPa. Utilizando pressão de 250 MPa e temperatura de 30 °C, a densidade aparente da espiga, talo e palha foram 1026 kg/m<sup>3</sup>, 1073 kg/m<sup>3</sup> e 900 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Quando utilizado temperatura de 80 °C e pressão de 150 MPa a densidade aparente do pellet foi de 1062 kg/m<sup>3</sup>, 1097 kg/m<sup>3</sup> e 995 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Observa-se

que com o aumento da temperatura, houve aumento da densidade aparente utilizando menor pressão.

### **2.3.1.6 Pressão**

Durante o processo de briquetagem, mecanicamente, são geradas pressões elevadas na ordem de 200 MPa provocando um aumento na temperatura da amostra na ordem 100 °C, elevação que torna a temperatura suficiente para a lignina promover plastificação e atuar como aglutinante das partículas da biomassa. A densidade do produto final também aumenta com o aumento da pressão aplicada durante a compactação (OLIVEIRA, 2014; NONA *et al*, 2014; FABORODE e O'CALLAGHAN, 1986).

## **2.4 Equipamentos utilizados para produção de briquetes**

A escolha do equipamento adequado depende do tipo de biomassa e tamanho das partículas que serão utilizadas para a produção dos briquetes, da densidade final e tamanho dos briquetes produzidos, do gasto energético do equipamento e da demanda de produção. A produção de briquetes pode ser feita utilizando diferentes tipos de equipamentos, como descritos a seguir.

### **2.4.1 Prensa de pistão mecânico e hidráulico**

Prensas de pistão mecânico são normalmente utilizadas para a produção em larga escala, que vão desde 25 a 1800 kg/h. A prensa de pistão mecânico é semelhante a uma prensa excêntrica. Um movimento de rotação contínuo excêntrico, ligado a um êmbolo, pressiona a matéria-prima através de uma matriz cônica que serve para compactar e extrudar na forma de briquetes (OLADEJI, 2015).

Na Figura 2 é mostrada uma prensa de pistão mecânico (a) e uma prensa de pistão hidráulico (b).

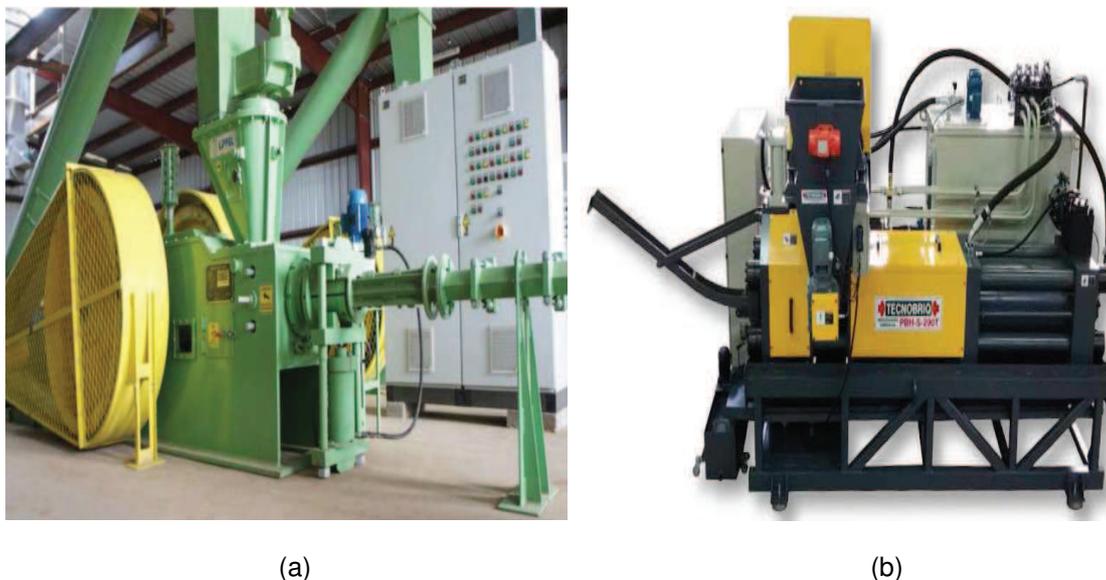


Figura 2: (a) Prensa de pistão mecânico e (b) pistão hidráulico.

Fonte: Lippel (2015) e Tecnobriq (2016).

Existem, também, prensas de pistão movidas por sistemas hidráulicos, que em geral encontram aplicações na compactação fria e de baixa pressão, pois não conseguem alcançar as elevadas pressões e temperaturas das prensas de pistão mecânico (BHATTACHARYA *et al.*, 1989).

Em estudo com resíduos de casca de café, resíduos da colheita do milho e serragem de eucalipto, Protásio *et al.*, (2011) comparou a densidade energética dos resíduos antes e após os mesmos passarem por processos de briquetagem em prensa hidráulica. Após a compactação, os resultados indicaram um aumento de 179 %, 321 % e 322 % na densidade energética da casca de café, da serragem de eucalipto e dos resíduos da colheita do milho, respectivamente.

#### 2.4.2 Prensa de rolos

De acordo com Yehia (2007), a compactação de biomassa utilizando prensas de rolos trabalha com o princípio de pressão e de aglomeração, na qual a pressão é aplicada entre dois rolos de contra rotação. A biomassa é alimentada por um silo na parte superior da prensa e quando forçada através do intervalo entre os dois rolos, é pressionada para dentro de uma matriz formando o

briquete. Na Figura 3 é mostrada uma prensa de rolo (a) e detalhe dos rolos extrudando a matéria-prima (b).

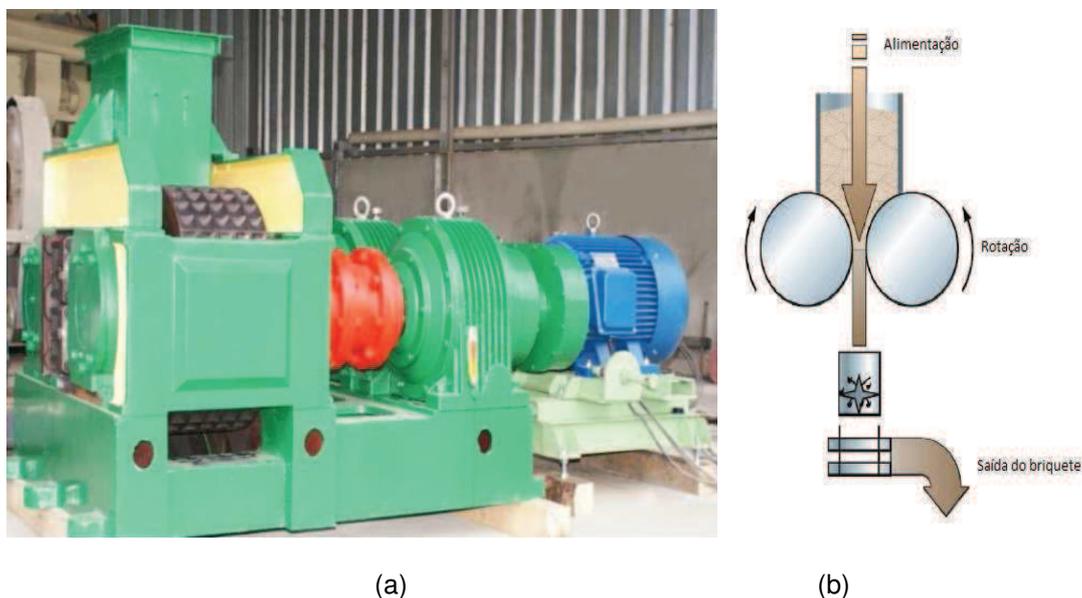


Figura 3: (a) Prensa de rolos e (b) detalhe dos rolos.

Fonte: Adaptado de Yehia (2007) e Lippel (2015).

Parâmetros de processo que desempenham um papel importante sobre a qualidade do produto compactado é o diâmetro dos rolos, a largura da abertura, a força do rolo, e a forma da matriz. Os dois rolos são dispostos de tal maneira que existe um pequeno espaço entre eles. A distância entre os dois rolos, que é normalmente referida como "fosso", depende de muitos fatores tais como o tipo de biomassa, o tamanho das partículas, o teor de umidade, e a adição de ligantes. A forma da biomassa compactada depende do tipo da matriz utilizada (YEHIA, 2007).

Esta tecnologia demanda biomassa com partículas de tamanhos menores do que os outros processos. O produto apresenta durabilidade inferior, porque o breve tempo de residência na prensa não permite alcançar as pressões e as temperaturas ideais para fluidificar a lignina (BHATTACHARYA *et al.*, 1989).

### 2.4.3 Prensa de parafuso sem fim (extrusora)

O objetivo de compactação usando prensa extrusora é fazer com que as partículas de biomassa fiquem mais próximas umas das outras, proporcionando um briquete mais resistente (TUMULURU *et al.*, 2011).

Durante a extrusão, o material move-se a partir do funil de alimentação, com a ajuda de um parafuso rotativo, através de um duto e contra uma matriz, o que resulta num gradiente de pressão e de atrito significativo, devido ao formato da biomassa. Os efeitos combinados de atrito na parede da matriz, a fricção interna no material e a velocidade de rotação do parafuso aumentam a temperatura no sistema fechado e aquece a biomassa (TUMULURU *et al.*, 2011).

A biomassa aquecida é forçada através da matriz de extrusão para formar os briquetes com a forma requerida. Se a matriz é mais cônica, a biomassa é mais compactada. Se o calor gerado no interior do sistema não for suficiente para que o material possa atingir um estado de pseudoplástico para uma extrusão suave, deve-se usar uma resistência para aquecer a matriz (GROVER e MISHRA, 1996).

A matriz pode apresentar várias formas. Tipicamente é cilíndrica ou levemente cônica. Em alguns modelos apresenta seção transversal poligonal. A matriz molda o briquete de acordo com a própria forma, sendo as mais convenientes as formas quadrada ou retangular para facilitar a estocagem dos briquetes. A forma poligonal também impede que a biomassa gire junto com a rosca, evitando assim atritos não desejados. Por esta razão, quando a seção da matriz é circular, na sua parede interior são geralmente escavados pequenos canais paralelos ao eixo de extrusão, os quais guiam a biomassa em movimento retilíneo (FILIPPETTO, 2008).

Ainda segundo Fillippetto (2008), existem basicamente três tipos de prensas de parafuso: prensa com parafuso cônico, prensa com parafuso cilíndrico e com matriz aquecida e prensa com parafusos gêmeos.

Em estudo realizado por Yan e Modigell (2012) utilizando uma prensa de parafuso, resíduos de faia e abeto sem secagem prévia com teor de umidade em torno de 100 % foram compactados e observou-se uma redução no teor de umidade em torno de 80 %.

Utilizando serragem de madeira para produzir briquetes em uma prensa extrusora com matriz aquecida, Bello *et al* (2015) observaram as seguintes características nos briquetes formados: teor de cinzas, dimensional (comprimento e diâmetro) após a briquetagem e resistência a queda gravitacional (percentual da perda de massa após repetidas quedas no piso de uma altura de 2 metros). Os resultados encontrados mostraram que os briquetes tiveram baixo teor de cinzas (7,3 %), resistência a queda gravitacional ficou entre 89,5 a 93,6 % e não houve alterações dimensionais (variação do diâmetro) significativas e briquetes com comprimento maior que 300 mm tenderam a defletir, apresentando rachaduras

#### 2.4.3.1 Prensa com parafuso cônico

Neste tipo de briquetadeira, o parafuso cônico alimenta a matéria-prima e a pré-compacta em uma antecâmara, posteriormente um cabeçote de compressão, compacta e extruda a biomassa em uma matriz. Na Figura 4 é mostrada uma prensa de parafuso cônico (a) e detalhe da prensa de parafuso cônico (b).

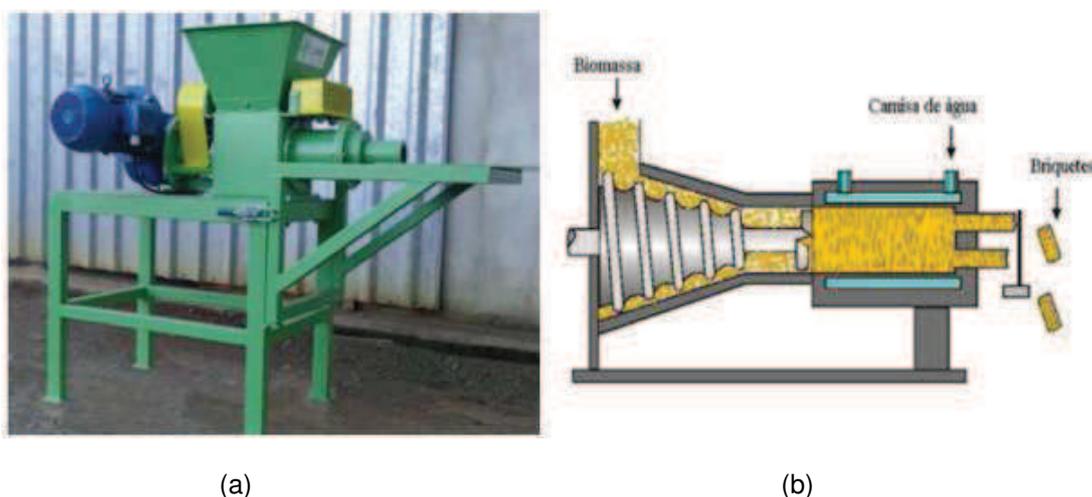


Figura 4: (a) Prensa de parafuso cônico e (b) detalhe da prensa de parafuso cônico.

Fonte: Bhattacharya *et al.* (1989) e Lipeel (2015).

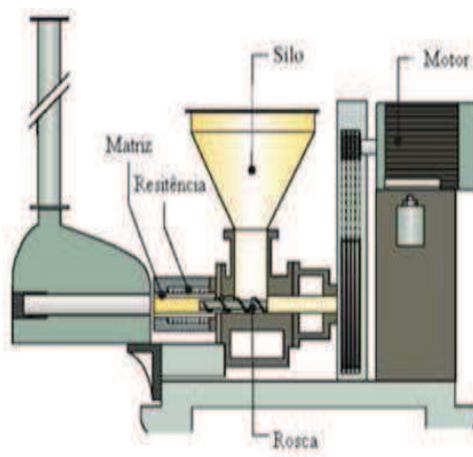
A matriz pode ser formada por furos múltiplos de 28 mm de diâmetro ou por um único furo de 95 mm. O aquecimento elevado gerado pelo atrito requer um sistema de resfriamento ao redor da matriz. A capacidade produtiva varia entre 600 e 1000 kg/h, dependendo do tipo de material. Apesar da excelente qualidade dos briquetes, o defeito desta máquina é o rápido desgaste da cabeça e os custos das peças de reposição (FILIPPETTO, 2008).

#### 2.4.3.2 Prensa com parafuso cilíndrico e matriz aquecida

Este é o tipo mais comum de briquetadeira de parafuso. Na Figura 5 é mostrada uma prensa de parafuso cilíndrico e matriz aquecida (a) e detalhe da prensa de parafuso cilíndrico e matriz aquecida (b). O parafuso transporta e empurra a matéria-prima contra a matriz. A compactação é possível porque o material que se acumula na matriz realiza uma contrapressão que comprime o material fresco empurrado pelo parafuso.



(a)



(b)

Figura5: (a) Prensa de parafuso com matriz aquecida e (b) detalhe da prensa de parafuso cilíndrico e matriz aquecida.

Fonte: Bhattacharya *et al.* (1989) e Lipeel (2015).

A matriz possui um ângulo de entrada (Figura 6) que influencia na formação dos briquetes. Conforme projeto desenvolvido pela empresa Ecodevices (2015), se o ângulo de entrada for muito grande, a pressão exercida

no interior da matriz será muito elevada, ocasionando explosões e o travamento da rosca de alimentação da biomassa. Se o ângulo for muito pequeno, não haverá pressão suficiente para a formação dos briquetes.

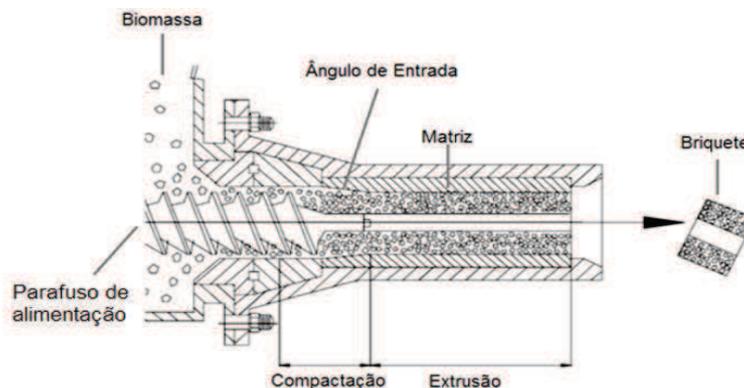


Figura 6: Dispositivo de extrusão (Parafuso de alimentação e Matriz).

Fonte: Ecodevices (2015)

Este tipo de briquetadeira utiliza aquecimento na matriz para fazer com que se seja criada uma camada de carvão na superfície do briquete, facilitando a fluidez do mesmo no interior da matriz durante a extrusão e melhorando a resistência à umidade. A matriz é geralmente mantida entre 250 e 300 °C. O aquecimento da matriz pode ser realizado com uma resistência elétrica em torno da parede externa ou com uma pequena fornalha. Os briquetes saem levemente torrados na superfície e com um furo central de 15-25 mm de diâmetro, devido ao eixo do parafuso (Figura 7). As elevadas temperaturas provocam formação de vapor e gases, que encontram um caminho de fuga preferencial no furo central dos briquetes em extrusão (FILLIPETTO, 2008).



Figura 7: Briquetes de prensa de parafuso com matriz de seção circular.

Fonte: Fillipeto (2008)

### 2.4.3.3 Prensa de parafusos gêmeos

Esta máquina é constituída por um par de parafusos acoplados em eixos paralelos para empurrar o material conjuntamente (Figura 8). O sistema é projetado de forma a conseguir extrudar partículas de tamanho superior do que os outros tipos de prensas de parafuso (até 80 mm) e com elevada taxa de umidade (até 25 %) (FILLIPPETTO, 2008).

A capacidade de produção varia de 2800 até 3600 kg/h dependendo da composição da matéria-prima (BHATTACHARYA *et al.*, 1989).



Figura 8: Prensa de parafusos gêmeos.

Fonte: CLEXTRAL (2015)

## 2.5 Torrefação de biomassa

A torrefação é um processo que visa à produção de um combustível que tenha propriedades melhoradas em comparação com a biomassa não tratada (MACHIN, 2015). Refere-se a um pré-tratamento térmico da biomassa, na qual é aquecida em uma atmosfera inerte, a temperaturas entre 200 e 300 °C, durante tempos curtos de residência, a fim de melhorar suas propriedades (TRANA *et al.*, 2013; CHEN *et al.*, 2015b).

Geralmente a biomassa não torrificada é caracterizada por seu alto teor de umidade, baixo poder calorífico, natureza higroscópica, ocupar grande

volume no armazenamento e baixa densidade aparente. Os benefícios realizados pela torrefação estão representados na Figura 9 (CHEN *et al.*, 2015c). Durante a torrefação, a umidade é removida e a hemicelulose degradada, provocando a liberação de ácido acético, frações de fenol e outros compostos de baixo poder calorífico. A lignina também sofre uma ligeira despolimerização (FELFLI, 2003).

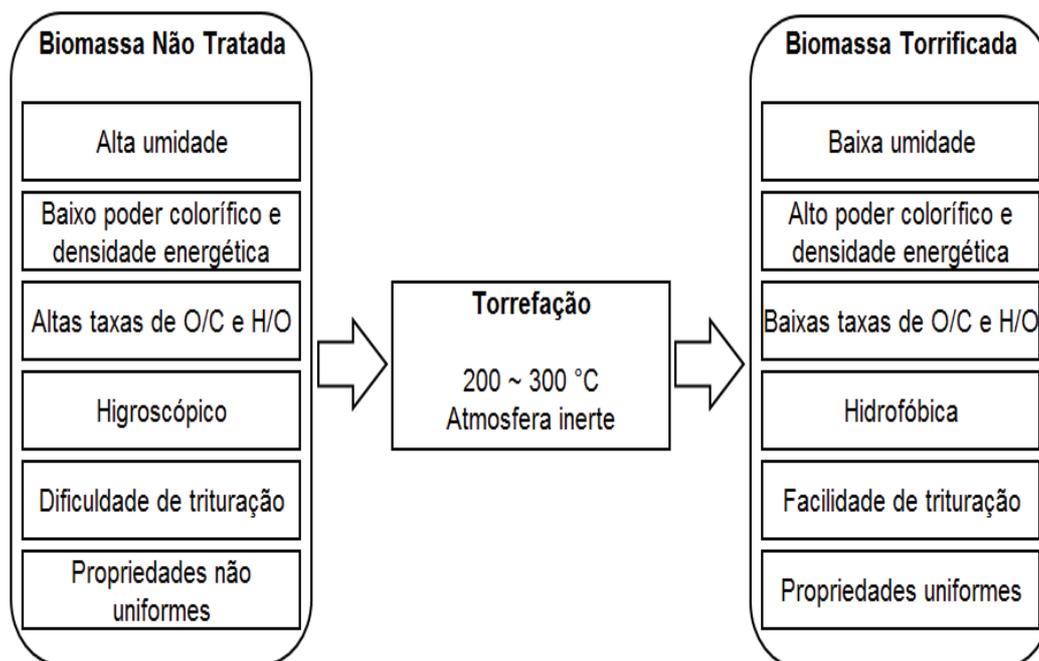


Figura 9: Esquema de variação das propriedades da biomassa submetidas a torrefação.

Fonte: CHEN *et al.* (2015c).

Quando a biomassa é torrificada, o pré-tratamento pode ser ainda classificado em processo de torrefação leve, médio e severo, que corresponde a temperaturas de cerca de 200 e 235, 235 e 275 e 275 e 300 °C, respectivamente (CHEN e KUO, 2011).

Com a torrefação leve, a umidade e os voláteis de baixo peso molecular contidos na biomassa são liberados. A hemicelulose da biomassa é o constituinte mais ativo entre as frações lignocelulósicas. A hemicelulose é termicamente degradada até um certo ponto na torrefacção leve, ao passo que a celulose e a lignina são apenas ligeiramente ou dificilmente afetadas. Portanto, a perda de massa da biomassa é pequena e a sua densidade de energia ou poder calorífico

aumenta apenas ligeiramente. Quando a biomassa sofre torrefação média, a decomposição da hemicelulose e a liberação de voláteis são intensificadas. O teor de hemicelulose é substancialmente reduzido e a celulose é consumida até certo grau. Na torrefação severa, a hemicelulose é degradada em sua maior parte e a celulose é oxidada. A lignina é o constituinte mais difícil de ser degradado termicamente. A sua degradação na faixa de temperaturas empregadas na torrefação é, portanto, muito baixa. Em virtude da remoção substancial de hemicelulose e celulose a partir da torrefação severa da biomassa, a massa e o rendimento energético da biomassa são geralmente reduzidos significativamente, embora a densidade energética do combustível seja intensificada em função do aumento do teor de carbono e carbono fixo e diminuição do teor de materiais voláteis (CHEN *et al.*, 2015c).

Em estudo realizado por Saeed *et al.* (2015) resíduos de casca de arroz, bagaço e palha de trigo foram torrificados utilizando temperaturas de 200, 250 e 300 °C. Após a torrefação, cada amostra foi misturada com um agente ligante (amido) e briquetes foram produzidos em escala de laboratório utilizando uma prensa hidráulica. O teor de umidade, a densidade e o poder calorífico foram avaliados antes e após a torrefação. Após a torrefação, ambas as biomassas apresentaram diminuição acentuada no teor de umidade, aumento da densidade e do poder calorífico.

Rodrigues e Rousset (2015) avaliaram os efeitos da torrefação nas principais propriedades energéticas da madeira de *Eucalyptus grandis*. A madeira foi torrificada em três temperaturas (220, 250 e 280 °C) e, posteriormente, foi analisada quanto ao rendimento mássico (razão entre a massa seca de madeira e a massa de madeira torrificada), à densidade aparente (razão entre a massa seca e torrificada e o volume seco e torrificado das amostras), ao poder calorífico (superior PCS, inferior PCI), a densidade energética (razão entre o poder calorífico e a densidade aparente) e o rendimento energético (produto do rendimento gravimétrico pela razão entre o PCS da madeira torrificada e o PCS da madeira natural). Os resultados obtidos indicaram que houve diferenças significativas para todas as propriedades analisadas, com exceção da densidade aparente que não apresentou diferença estatística entre a testemunha e a temperatura de 220 °C. A temperatura de

250 °C gerou a melhor densidade energética em função do aumento do poder calorífico e da baixa queda na densidade aparente.

Benavente e Fullana (2015) utilizando resíduos de azeite de oliva torrificados com temperaturas entre 150 e 300 °C, observaram o aumento do poder calorífico de 26,4 para 30,0 MJ/kg sendo que o melhor resultado foi a 200 °C em termos de maximizar o valor de aquecimento e minimizar as perdas de energia. Briquetes utilizando os resíduos torrificados foram produzidos em uma prensa pistão hidráulica apresentando boa resitência mecânica e densidade energética de 26,7 GJ/m<sup>3</sup>.

### 3 METODOLOGIA

Os principais procedimentos adotados neste estudo para atender aos objetivos propostos foram a obtenção, a preparação e a caracterização física, química e térmica das amostras de folhas ressecadas de bananeira, a determinação e avaliação das propriedades visco-elásticas dos briquetes obtidos nos ensaios de compactação em escala de bancada e a briquetagem em extrusora das folhas ressecadas com duas faixas diferentes de distribuição granulométrica. A influência da torrefação prévia das folhas de bananeira sobre as suas propriedades químicas, térmicas e visco-elásticas e sobre o processo de briquetagem por extrusão foi avaliada.

Por fim, foram avaliadas as densidades aparente e energética das amostras de folhas de bananeira sem torrificar e torrificadas e comparadas com as dos briquetes obtidos nos ensaios de compactação em escala de bancada.

#### 3.1 Obtenção e preparação da biomassa

As folhas de bananeiras foram obtidas em propriedade particular localizada no bairro Jardim Paraíso, Joinville-SC (Figura 10). Foram recolhidas somente as folhas que já se encontravam ressecadas.



Figura 10: Folhas de bananeira ressecadas coletadas.

As folhas foram trituradas em triturador forrageiro, DPM-4 Nogueira (Figura 11), empregando peneiras com furos de 5 e 10 mm para controle do tamanho das partículas.



Figura 11: Triturador forrageiro DPM-4.

As folhas de bananeira trituradas (Figura 12) foram submetidas à análise granulométrica, seguindo procedimentos da norma ASTM E828-81 (2004). Foram utilizadas peneiras da série Tyler com diferentes malhas, com tempo de agitação de 15 min e frequência de 80 Hz.

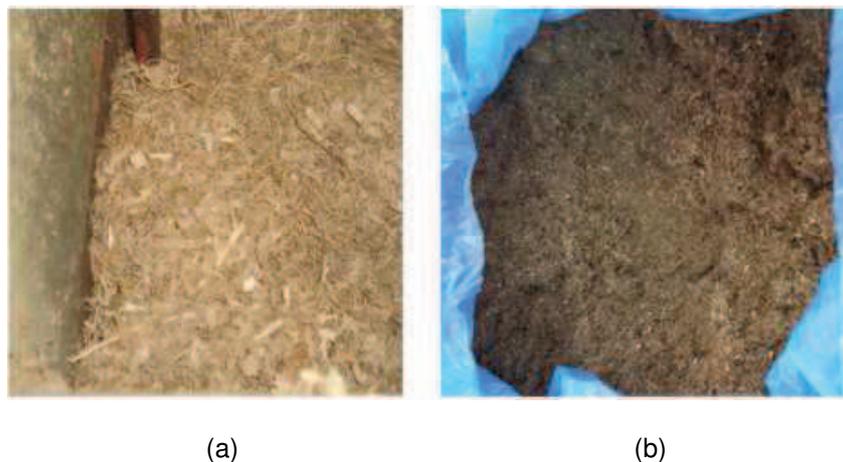


Figura 12: Folhas de bananeira trituradas em diferentes granulometrias: a) peneira de 10 mm e b) peneira de 5 mm.

### 3.2 Caracterização das folhas de bananeira

Amostras de folhas de bananeira triturada (5 e 10 mm) foram submetidas à análises químicas e térmicas para a caracterização, conforme apresentado na Figura 13. Estas análises também foram empregadas para as amostras torrificadas, visando a comparação das propriedades.

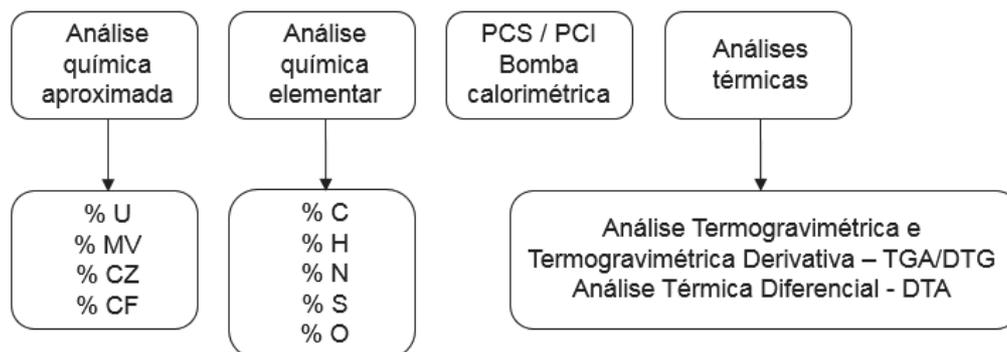


Figura 13: Análises realizadas nas amostras de folhas de bananeira.

#### 3.2.1 Análise química aproximada

A análise química aproximada para determinar os teores de umidade (% U), materiais voláteis (% MV), cinzas (% CZ) e carbono fixo (% CF) foi realizada por secagem em estufa e queima em forno mufla.

O teor de umidade foi determinado empregando os procedimentos da norma ASTM E871-82 (2006). Nos ensaios foram empregados 50 g das amostras e as mesmas foram secas em estufa a 105°C durante três horas conforme os procedimentos.

Para o cálculo do teor de umidade (% U) utilizou-se a Equação 1:

$$\% U = \frac{mac - msc}{m_0} * 100 \quad (1)$$

Onde, *mac* representa a massa da amostra com o peso do cadinho, *msc* é a massa da amostra após a secagem a 105 °C mais o peso do cadinho e *m<sub>0</sub>* é a quantidade de amostra inicialmente colocada no cadinho.

O teor de materiais voláteis (% MV) foi determinado de acordo com a norma ASTM E 872-82 (2006) e Equações 2 e 3.

$$\% MV = \% A - \% U \quad (2)$$

$$\% A = \frac{mac - mcal}{m_0} * 100 \quad (3)$$

Onde, % U é o valor obtido com a Equação 1 e *mcal* representa a massa da amostra calcinada após queima em mufla a 575 °C por 3 horas.

O teor de cinzas (% CZ) foi calculado a partir da Equação 4, conforme procedimentos estabelecidos na norma ASTM E1755-01 (2007).

$$\% CZ = \left[ \frac{mash - mcont}{mod - mcont} \right] * 100 \quad (4)$$

Onde, *mash* é a massa da cinza e cadinho seco, *mcont* é a massa do cadinho seco e *mod* é a massa inicial da amostra e cadinho seco.

O teor de carbono fixo (% CF) foi determinado pela diferença entre 100 % e a soma dos percentuais de materiais voláteis e cinzas, como mostrado na Equação 5.

$$\% CF = 100 - [\% CZ + \% MV] \quad (5)$$

Todos os ensaios foram realizados em triplicata e seus resultados apresentados como média dos valores obtidos.

### 3.2.2 Análise química elementar

Os teores de carbono (% C), hidrogênio (% H) e nitrogênio (% N) foram determinados por analisador elementar modelo Perkin Elmer 2400 serie II e o teor de enxofre (% S) por espectrômetro de emissão atômica com plasma induzido (ICP-AES), modelo Spectro Cirrus CCD. Essas análises foram

realizadas pela Central Analítica do Instituto de Química da Universidade de São Paulo - USP.

De acordo com Garcia *et al.*, (2012), o método consiste na queima das amostras em atmosfera oxidante, com combustão completa desenvolvida. Os gases gerados durante a queima, tais como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>, são continuamente medidos e então calculados os percentuais dos elementos carbono (% C), hidrogênio (% H), nitrogênio (% N) e enxofre (% S). As análises foram realizadas em duplicata.

O teor de oxigênio (% O) foi determinado a partir da Equação 6, conforme Motghare *et al.* (2016).

$$\% O = 100 - [\% C + \% H + \% N + \% S + \% CZ] \quad (6)$$

### 3.2.3 Poder calorífico

O Poder Calorífico Superior (PCS) e Inferior (PCI) dos resíduos, foi determinado por bomba calorimétrica, modelo 1241 Parr, seguindo as normas ABNT NBR 8633 e ABNT 8636, indicadas para o carvão vegetal, porém adaptada para qualquer combustível sólido. Os ensaios foram efetuados no Núcleo de Extensão do Departamento de Química - UFMG. As análises foram realizadas em duplicata.

O poder calorífico de um combustível é a quantidade de calor produzida, ou gerada, pela combustão completa de uma unidade de combustível, podendo ser uma unidade de massa (kg) ou unidade de volume (m<sup>3</sup>), podendo ser Poder Calorífico Superior (PCS) que é a quantidade de calor gerado pela combustão completa de uma unidade de volume ou massa do combustível, considerando condições de referência para temperatura e pressão, havendo condensação de vapor de água, ou seja, inclui o calor latente de vaporização ou Inferior (PCI) quando nas mesmas condições que o poder calorífico superior, mas com a água formada na reação de combustão ainda em estado gasoso, ou seja, não inclui o calor latente de vaporização (MORAN e SHAPIRO, 2006).

### 3.2.4 Análises térmicas

Para o estudo do comportamento térmico da folha de bananeira foram realizadas Análise Termogravimétrica e Termogravimétrica Derivativa (TGA/DTG) e Análise Térmica Diferencial (DTA).

As análises foram realizadas sob atmosfera oxidante (ar sintético), na faixa de temperatura ambiente até 900 °C e taxa de aquecimento de 10 °C/min em analisador térmico simultâneo, modelo Netzsch STA 449F3, no Laboratório de Polímeros e Compósitos da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

### 3.3 Torrefação das amostras de folhas de bananeira

A torrefação das folhas de bananeira ressecadas foi realizada na empresa Bioware Tecnologia, Campinas - SP, em um reator de leito fixo, especialmente projetado para este fim, com 120 mm de diâmetro e 280 mm de profundidade (Figura 14). Para coleta dos dados de temperatura foi utilizado o *software* Fieldlogger.



Figura 14: Reator para torrefação de biomassa.

O tempo de residência das amostras foi de 1 min em atmosfera isenta de oxigênio. As temperaturas de torrefação foram 220, 250 e 280 °C. Estes parâmetros foram definidos baseando-se em estudos de Felfli (2003), Felfli *et al* (2005) e Chen *et al.* (2015b), visando avaliar a influência da torrefação lenta, média e severa nas propriedades da biomassa.

Na Figura 15 são mostradas fotos das amostras não torrificada e torrificadas sob diferentes temperaturas.

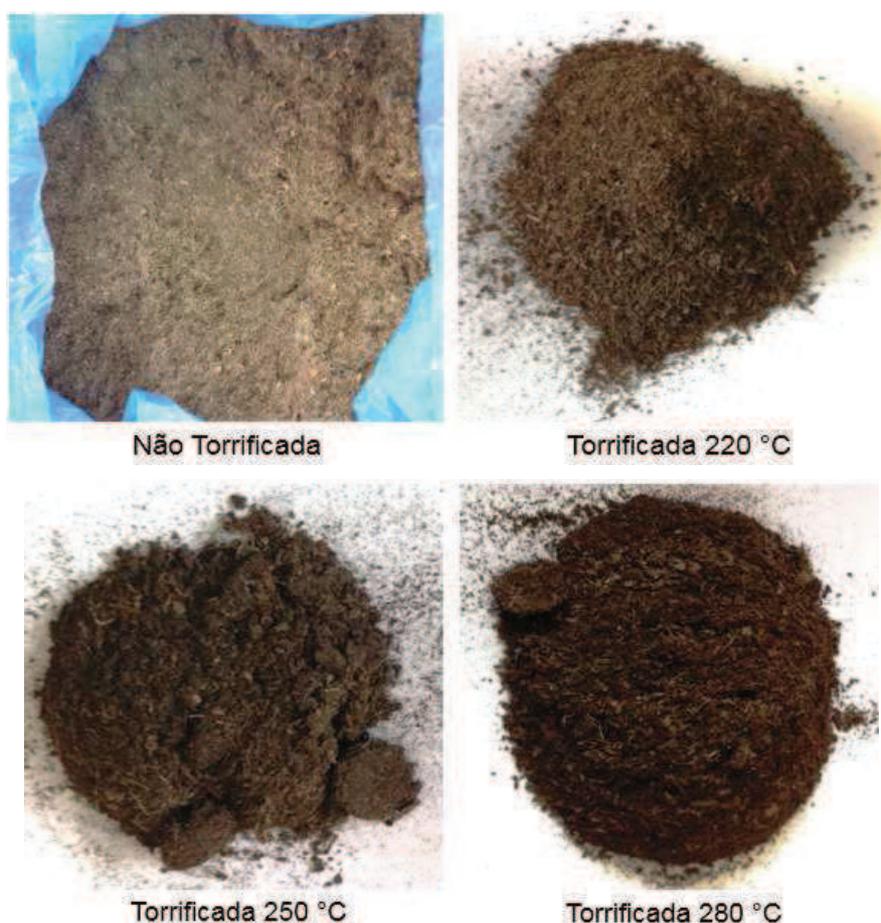


Figura 15: Amostras de folhas de bananeira não torrificada e torrificadas.

### 3.4 Avaliação das propriedades visco-elásticas das folhas de bananeira

Para avaliar as propriedades visco-elásticas das folhas de bananeira ressecadas e trituradas em dois diferentes tamanhos de partículas e da biomassa após a torrefação, as amostras foram submetidas a ensaios de

compactação, realizados na empresa Bioware Tecnologia, Campinas - SP, em um dispositivo de bancada especialmente projetado para este fim, conforme mostrado na Figura 16.



Figura 16: Dispositivo de ensaio de compactação com controle de temperatura.

O dispositivo consistiu em um cilindro de compressão fabricado em aço liga temperado apoiado em uma base intercambiável, envolto por uma resistência elétrica para aquecimento do cilindro. A compressão foi realizada por um pistão de aço nitretado com diâmetro nominal de 25 mm. O percurso total do pistão dentro do cilindro foi de 194 mm. Este dispositivo foi adaptado para ser usado em uma prensa de ensaio de materiais modelo EMIC DI1000, com célula de pressão TRD28 acoplada a um sistema de aquisição de dados via computador usando o *software* TESC 3.04.

As propriedades visco-elásticas das folhas de bananeira foram determinadas sob pressões de compactação de 20, 40 e 60 MPa e temperaturas de 30 °C e 120 °C, sendo 30 °C correspondente à temperatura ambiente e 120 °C à temperatura aproximada de amolecimento da lignina e temperatura média interna do briquete durante a extrusão, conforme dados de trabalhos realizados com diferentes biomassas pela empresa Ecodevices (2015). A velocidade de compactação foi de 200 mm/min. Na Tabela 2 estão apresentadas as variáveis independentes e de resposta do processo de compactação. O estudo resultou num total de 24 experimentos.

Tabela 2: Variáveis do processo de compactação.

Biomassa	Variáveis independentes		Variáveis dependentes ou de resposta			
	Temperatura (°C)	Pressão (MPa)	Comportamento do material na compactação	Características do processo		
Não Torrificada	30	20	* Módulo de compactação ( $k_0$ ) [MPa] * Índice de porosidade ( $b$ ) [Adimensional] * Densidade final ( $\rho$ ) [kg/m <sup>3</sup> ] * Densidade Crítica ( $\rho_c$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]	* Energia de compactação ( $E_c$ ) [J] * Taxa de compactação ( $r$ ) [Adimensional]		
		40				
		60				
	120	20				
		40				
		60				
Torrificada 220 °C	30	20			* Módulo de compactação ( $k_0$ ) [MPa] * Índice de porosidade ( $b$ ) [Adimensional] * Densidade final ( $\rho$ ) [kg/m <sup>3</sup> ] * Densidade Crítica ( $\rho_c$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]	* Energia de compactação ( $E_c$ ) [J] * Taxa de compactação ( $r$ ) [Adimensional]
		40				
		60				
	120	20				
		40				
		60				
Torrificada 250 °C	30	20	* Módulo de compactação ( $k_0$ ) [MPa] * Índice de porosidade ( $b$ ) [Adimensional] * Densidade final ( $\rho$ ) [kg/m <sup>3</sup> ] * Densidade Crítica ( $\rho_c$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]	* Energia de compactação ( $E_c$ ) [J] * Taxa de compactação ( $r$ ) [Adimensional]		
		40				
		60				
	120	20				
		40				
		60				
Torrificada 280 °C	30	20			* Módulo de compactação ( $k_0$ ) [MPa] * Índice de porosidade ( $b$ ) [Adimensional] * Densidade final ( $\rho$ ) [kg/m <sup>3</sup> ] * Densidade Crítica ( $\rho_c$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]	* Energia de compactação ( $E_c$ ) [J] * Taxa de compactação ( $r$ ) [Adimensional]
		40				
		60				
	120	20				
		40				
		60				

Faborode e O'Callaghan (1986) descreveram o comportamento da compactação de materiais fibrosos agrícolas como uma relação entre a pressão aplicada na matéria-prima e a taxa de compressão (razão entre a densidade final e a densidade inicial), sendo expressa, conforme a Equação 7:

$$\sigma k = \frac{k_0}{b} [e^{b(r-1)} - 1] \quad (7)$$

Onde:

$\sigma k$ : pressão de compactação, em MPa;

$k_0$ : módulo de compactação que representa a resistência que o material oferece a compactação, em MPa;

$b$ : índice de porosidade, que expressa a porosidade ou o relaxamento da acomodação do material antes de iniciada a compressão (Adimensional);

$r$ : taxa de compressão, definida como a razão entre a densidade em determinada fase de compressão pela densidade inicial do material a ser comprimido (Adimensional).

A densidade inicial ( $\rho_i$ ) é a densidade do material na matriz do dispositivo (densidade de acondicionamento do material) calculada conforme Equação 8:

$$\rho_i = \frac{ma}{vc} \quad (8)$$

Onde,  $ma$  é a massa da amostra (g) e  $vc$  é o volume ( $\text{mm}^3$ ) do cilindro de compactação.

A densidade final ( $\rho$ ) ou densidade do material compactado, foi calculada pela razão entre a massa da amostra ( $ma$ ) utilizada nos ensaios e o volume do briquete formado ( $vb$ ), conforme Equação (9), sendo o volume do briquete formado ( $vb$ ) calculado conforme Equação 10:

$$\rho = \frac{ma}{vb} \quad (9)$$

$$vb = Ac * (Al - Df) \quad (10)$$

Onde,  $Ac$  é área ( $\text{mm}^2$ ) do cilindro de compactação,  $Al$  é a altura (mm) do cilindro de compactação e  $Df$  é a deformação do briquete, determinada pelo *software* TESC 3.0.

Segundo Faborode e Ocallaghan (1986), a percentagem de vazios na massa de material sem compactar afeta significativamente os mecanismos de compactação, pois determina a quantidade do fluxo de ar e de calor durante a compactação. Neste sentido a porosidade ( $F_k$ ) pode ser determinada conforme Equação 11, onde  $\rho_s$  é a densidade das partículas e  $\rho_i$  é a densidade inicial.

$$F_k = \frac{\rho_s - \rho_i}{\rho_s} \quad (11)$$

Durante a compressão, se considerar a densidade inicial ( $\rho_i$ ) relacionada com a densidade das partículas ( $\rho_s$ ), em uma fase posterior durante a compressão, pode-se definir um índice ( $b'$ ) conforme a Equação 12:

$$b' = \frac{\rho_i}{\rho_s} \quad (12)$$

Substituindo o índice ( $b'$ ) na Equação 11, obtém-se a Equação 13:

$$F_k = 1 - b' \quad (13)$$

Durante a compressão, o material passa por uma fase na qual a densidade é denominada densidade crítica ( $\rho_c$ ), definida como o ponto a partir do qual as forças elásticas começam a ser significativas e o material passa da fase dispersa para a fase densa e foi calculada de acordo com a Equação 14. A fase dispersa é dominada por forças de inércia das partículas de material separadas por vazios de ar e a fase densa, que ocorre quando o material está se fundindo, é dominada pelas forças elásticas geradas pelo material sólido (FABORODE e OCALLAGHAN, 1986).

$$\rho_c = \frac{\rho_i}{b} \quad (14)$$

Dessa forma, o índice de porosidade pode ser expresso conforme Equação 15:

$$b = \frac{\rho_i}{\rho_c} = b' = \frac{\rho_i}{\rho_s} \quad (15)$$

Portanto, o índice de porosidade pode ser expresso como uma função da porosidade inicial do material conforme Equação 16:

$$b = \varphi(1 - F_k) \quad (16)$$

Esta equação mostra que o índice de porosidade ( $b$ ) é uma constante que representa o estado de pré-compactação do material. Portanto, é esperado que quanto maior a densidade inicial ( $\rho_i$ ) menor é a porosidade ( $F_k$ ) e consequentemente o índice de porosidade ( $b$ ) apresente valores maiores (FABORODE e OCALLAGHAN, 1986).

O módulo de compactação ( $k_0$ ) e o índice de porosidade ( $b$ ) foram determinados pelo ajuste da equação utilizando o *software* OriginPro 8, conforme mostrado na Figura 17. A técnica de ajuste usada para determinar os coeficientes da Equação 7, foi a do mínimos quadrados para modelos não lineares. Em todos os casos o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) sempre foi superior a 0,99.

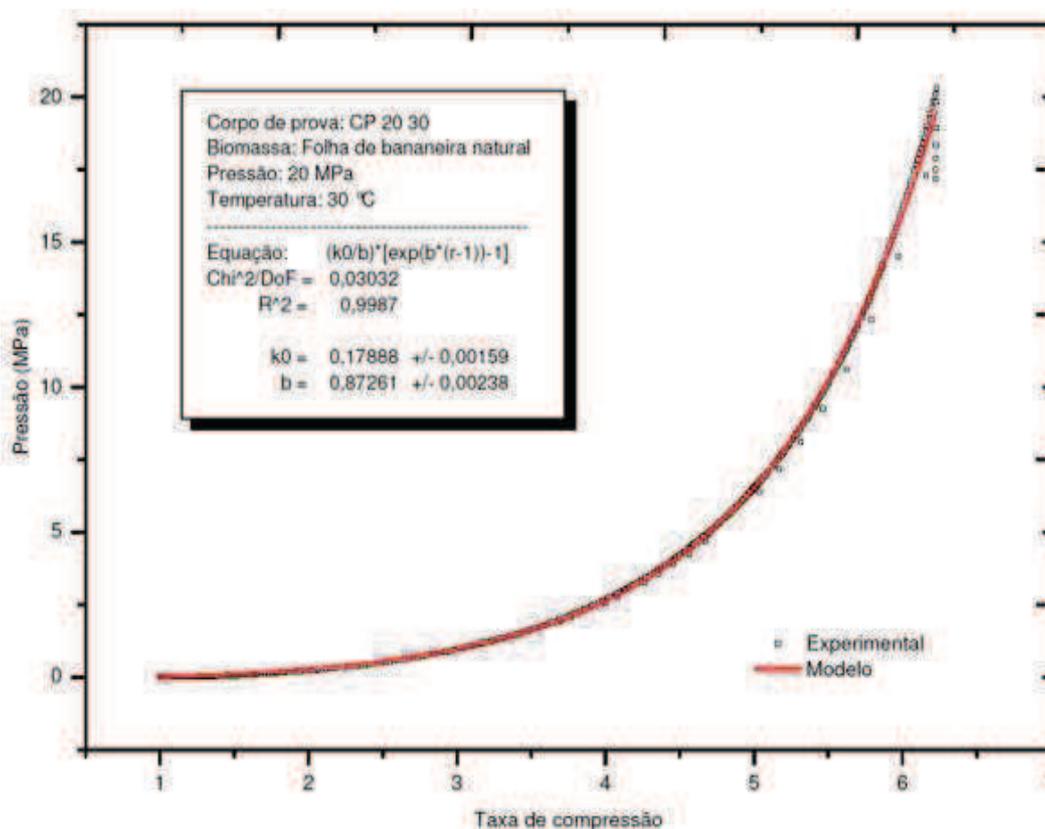


Figura 17: Exemplo de ajuste do modelo.

A energia de compactação ( $E_c$ ) expressa em Joule (J) foi calculada pela integral da curva de força versus deslocamento do pistão utilizando o *software* OriginPro 8, conforme mostrado na Figura 18.

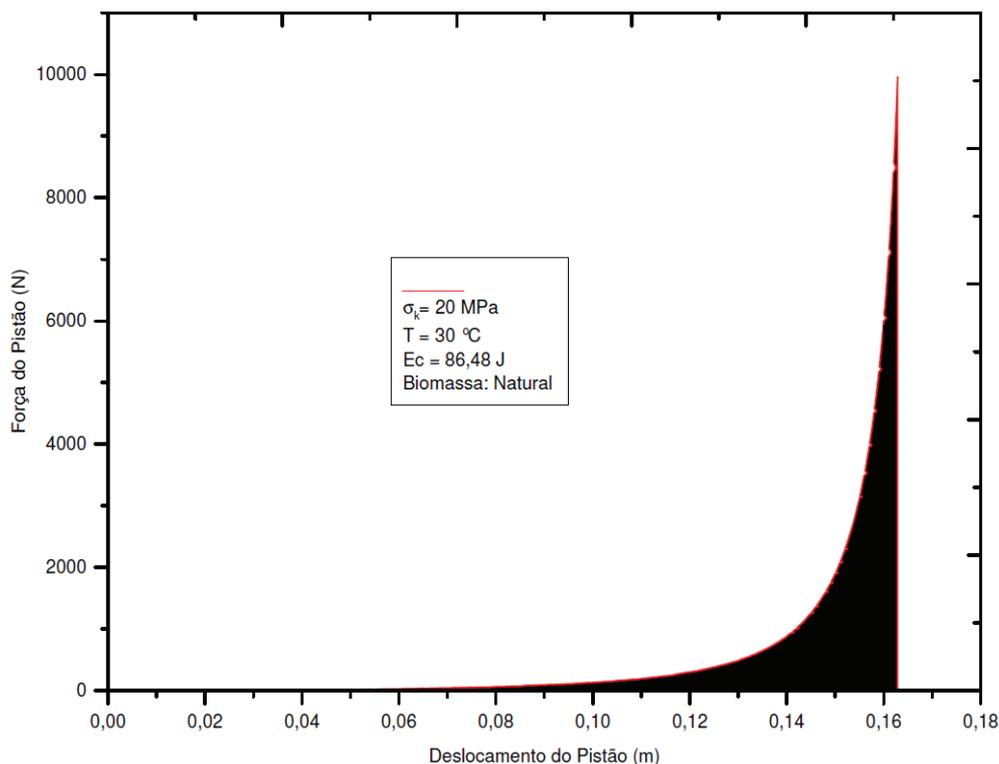


Figura 18: Exemplo da curva para determinação da energia de compactação.

Os resultados relativos as propriedades visco-elásticas foram avaliados por análise estatística de variância (ANOVA) das médias com intervalo de confiança de 95%. A hipótese de igualdade das médias analisadas foi rejeitada para  $p < 0,05$ .

### 3.5 Briquetagem

Os ensaios de briquetagem das folhas de bananeira foram realizados na empresa Bioware Tecnologia, Campinas - SP, utilizando uma prensa extrusora com matriz aquecida modelo BIOTOR-GII com capacidade produtiva de 500 kg/h, conforme mostrado na Figura 19.

A briquetagem em extrusora foi empregada primeiro para as amostras com faixa de granulometria maior e a qualidade dos briquetes foi avaliada. Um segundo ensaio foi realizado utilizando granulometria menor. Para ambas as granulometrias foram utilizados os mesmos parâmetros durante a extrusão dos briquetes.



Figura 19: Prensa extrusora briquetadeira BIOTOR-GII.

Na extrusora, foram testadas temperaturas de 320, 350, 380, 390 e 410 °C para o aquecimento da matriz, nestas temperaturas ocorrerá a homogeneização da temperatura no interior do briquete e formação de uma camada superficial de carvão no briquete facilitando a fluidez do mesmo durante a briquetagem e velocidade de rotação da rosca de 800 RPM. Para a produção dos briquetes, foram utilizadas matrizes com ângulos de entrada de 7, 8 e 15°, sendo esses definidos pela empresa Ecodevices (2015), com base em trabalhos realizados com biomassa de serragem de eucalipto, visando obter briquetes de boa qualidade. Na Figura 20, está apresentado um dos conjuntos de matriz e cilindro utilizado nos ensaios.



Figura 20: Matriz e cilindro de saída utilizado para a produção de briquetes na extrusora.

Fonte: Ecodevices (2015)

### **3.6 Determinação da densidade energética e aparente**

As densidades energéticas das folhas de bananeiras não compactadas e dos briquetes foram determinadas multiplicando-se a densidade aparente das folhas trituradas e dos briquetes pelo poder calorífico específico de cada material, seguindo método proposto por Maia (2013). Os resultados foram expressos em MJ/m<sup>3</sup>.

A densidade aparente das folhas de bananeira foi determinada pela razão entre a massa da biomassa e o volume do cilindro durante os ensaios de compactação.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da classificação granulométrica das folhas de bananeira trituradas, verificou-se que cerca de 70 % das partículas foram maiores que 3,50 mm e menores que 10 mm utilizando a peneira de 10 mm e cerca de 81 % das partículas foram menores que 1,70 mm utilizando a peneira de 5 mm.

### 4.1 Análise química aproximada das folhas de bananeira não torrificada e torrificadas

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios da análise química aproximada, teor de umidade (% U), materiais voláteis (% MV), cinzas (% CZ) e carbono fixo (% CF), das folhas de bananeira não torrificadas e torrificadas a 220, 250 e 280 °C.

Tabela 3: Análise química aproximada das folhas de bananeira não torrificada e torrificadas.

Biomassa	Análise Aproximada (%)			
	Umidade	Materiais Voláteis	Cinzas	Carbono Fixo
Não Torrificada	12,38 ± 0,66	77,79 ± 1,93	10,90 ± 0,27	11,51 ± 1,85
Torrificada 220 °C	7,29 ± 0,02	74,22 ± 0,64	12,15 ± 0,44	13,32 ± 1,07
Torrificada 250 °C	6,40 ± 0,30	63,54 ± 1,01	14,92 ± 0,14	21,54 ± 0,95
Torrificada 280 °C	6,46 ± 0,15	59,79 ± 0,34	18,94 ± 1,58	21,27 ± 1,50

As folhas de bananeira não torrificadas com 12,4 % de umidade encontram-se na faixa ideal de umidade, de 8 a 15 %, para serem transformadas em briquetes, conforme descrito por Maia (2013). A torrefação da biomassa ocasionou diminuição no teor de umidade, sendo que a folha de bananeira torrificada a 280 °C apresentou redução de 47,8 % no teor de umidade. Santos e Silva (2015) encontraram valores de 15,6 % e 5,1 %, respectivamente, para os resíduos de cacau não torrificado e torrificado a 250 °C. Isso se deve, principalmente, à eliminação da hemicelulose, que confere a absorção de água por ligação de hidrogênio.

O teor de umidade é uma propriedade importante nos combustíveis de biomassa, pois se elevado, conduz a uma elevada perda de energia durante a combustão (CHEN *et al.*, 2015c). Os estudos realizados por Felfli *et al.* (2005), Peng *et al.* (2013), Li *et al.* (2012) e Ohm *et al.* (2015) mostram que a torrefação altera a natureza higroscópica da biomassa para hidrofóbica, de modo que o teor de umidade é reduzido significativamente. Por exemplo, no estudo de Felfli *et al.* (2005), o teor de umidade em briquetes produzidos com resíduos de madeira foi reduzido em aproximadamente 73 % após a torrefação com temperatura de 220 °C e tempo de residência 0,5 h.

Houve redução do teor de materiais voláteis das folhas de bananeira com o aumento da temperatura de torrefação e, conseqüentemente, aumento no teor de carbono fixo. Os valores variaram de 77,8 a 59,8 % para materiais voláteis e de 11,5 a 21,3 % para carbono fixo, sendo estes valores os extremos, respectivamente. Esse comportamento dos teores de materiais voláteis e carbono fixo também foi observado e descrito por outros autores para diferentes biomassas. Chen *et al.* (2015b) obtiveram em estudos realizados com resíduos de algodão não torreficado e torreficado a 280 °C, valores que variaram entre 75,4 e 56,2 % para materiais voláteis e 18,1 a 32,5 % para carbono fixo, respectivamente. Rodrigues (2009) obteve valores para carbono fixo de 19,6 % para madeira de *Eucalyptus grandis* sem torreficar e de 24,7 % para madeira torreficada a 250 °C, e os teores de materiais voláteis variaram entre 80,2 e 75,2 %, respectivamente.

A quantidade de carbono fixo estabelece a quantidade de calor gerado na combustão. É preferível que o teor de carbono fixo seja alto, pois quanto maior este percentual mais lentamente o combustível irá queimar (SANTOS e SILVA, 2015). A diminuição do teor de materiais voláteis e aumento do teor de carbono fixo, se dá em virtude do processo de desidratação da biomassa a partir da torrefação, pois, umidade e materiais voláteis são liberados da biomassa (CHEN *et al.*, 2015c).

O teor de cinzas aumentou diretamente com a temperatura de torrefação. Este mesmo comportamento foi observado por Chen *et al.* (2015b) em seus estudos com resíduos de algodão. Conforme Souza (2014), as cinzas presentes na biomassa são consideradas como incombustíveis ou como fração inerte da amostra e podem efetivamente reduzir o poder calorífico. Os resultados do teor

de cinzas para as biomassas torrificadas a 250 e 280 °C ficaram aproximadamente 36,8 e 73,8 %, respectivamente, maiores quando comparados com a biomassa sem torificar, enquanto que para a biomassa torrificada a 220 °C, o aumento foi de 15,7 %.

A torrefação a 220 °C foi a que apresentou os melhores resultados entre as folhas torrificadas, com teor de umidade de 7,3 %, valor este próximo do valor da faixa ideal, teor de cinzas próximo ao da folha não torrificada (12,2 %), aumento de 15,7 % no teor de carbono fixo e redução de 4,6 % no teor de materiais voláteis em relação a folha não torrificada, respectivamente.

#### 4.2 Análise química elementar e poder calorífico das folhas de bananeira não torrificada e torrificadas

Os resultados da análise química elementar (C, H, N, S e O) e do poder calorífico das amostras de folhas ressecadas de bananeira não torrificadas e torrificadas estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Análise química elementar e poder calorífico superior das folhas de bananeira não torrificada e torrificadas.

Biomassa	Análise Elementar (%)					PCS (MJ/kg)
	Carbono	Hidrogênio	Nitrogênio	Enxofre	Oxigênio	
Não Torrificada	39,96 ± 0,02	5,55 ± 0,06	0,52 ± 0,10	0,15 ± 0	43,07	15,90
Torrificada 220 °C	45,73 ± 0,02	5,40 ± 0,08	1,01 ± 0,10	0,18 ± 0	35,84	19,00
Torrificada 250 °C	47,13 ± 0,12	5,09 ± 0,14	1,19 ± 0,02	0,18 ± 0	31,03	20,30
Torrificada 280 °C	46,72 ± 0,86	4,57 ± 0,07	1,24 ± 0,11	0,18 ± 0	28,35	20,70

Com a torrefação das folhas de bananeira, o teor de carbono aumentou. Este aumento foi mais significativo comparando a folha de bananeira não torrificada (39,9 %) com a primeira torrefação a 220 °C (45,7 %). As variações entre a 1ª torrefação e as demais não foram tão expressivas, 47,1 e 46,7 %, respectivamente. O aumento do teor de carbono está ligado ao aumento no poder calorífico. Os valores dos teores de hidrogênio diminuíram com a torrefação. Este mesmo comportamento foi observado por Chen *et al.* (2015a) no estudo realizado com palha de milho. De acordo com os autores, para a

biomassa não torrificada, o teor de carbono encontrado foi de 44,8 %, enquanto que para a palha torrificada a 270 °C esse teor foi de 51,2 %. O teor de hidrogênio ficou entre 4,0 e 5,5 %, semelhante ao observado para a folha de bananeira.

O teor de enxofre das folhas de bananeira sofreu pouca influência com o processo de torrefação mantendo-se baixo (0,18 %). O teor de nitrogênio apresentou aumento após o processo de torrefação, como observado por Chen *et al.* (2015b) para o resíduo de algodão, porém os valores são menores que o citado por Gil *et al.* (2015) para o carvão (1,7 %). Estes resultados são favoráveis, pois implicam em baixa geração de óxidos de enxofre e nitrosos durante processo de combustão, os quais são gases tóxicos e corrosivos (MAIA, 2013).

Os teores de oxigênio reduziram significativamente em função do aumento da temperatura de torrefação, aumentando assim, os teores de carbono. Chen *et al.* (2015a), em estudos de torrefação de resíduos de talo de milho, encontraram valores de 44,8 % de carbono e 42,5 % de oxigênio para o talo de milho sem torrefação e 46,6 % de carbono e 39,4 % de oxigênio para o talo de milho torrificado a 240 °C. Essa alteração influencia diretamente no aumento do poder calorífico da biomassa (CHEN *et al.*, 2015c).

Observa-se que os valores de poder calorífico superior (PCS) foram semelhantes aos de outras biomassas descritas em literatura (Sadaka e Negi (2009) e Ohm *et al.* (2015)). Para a folha torrificada a 220 °C, o aumento do poder calorífico em relação à amostra não torrificada foi de 19,5 %. Esse comportamento também foi observado no estudo realizado com a palha de trigo por Sadaka e Negi (2009), no qual os resultados mostraram que o poder calorífico superior aumentou de 16,6 MJ/kg para 22,7 MJ/kg, ou seja, 37 %, quando a biomassa foi submetida a uma temperatura de torrifficação de 315 °C. Ohm *et al.* (2015) também observaram um aumento no poder calorífico superior após a torrefação realizada na faixa de 250 a 350 °C. Para os quatro tipos de biomassa estudadas (casca de amêndoa, resíduos de madeira, bagaço e galhos), o poder calorífico foi maior que 21,1 kJ/kg.

Verifica-se a partir da Tabela 4 que o aumento da temperatura de torrefação ocasionou um aumento no teor de carbono, diminuição nos teores de hidrogênio e oxigênio e aumento no teor de nitrogênio. As propriedades

energéticas da folha de bananeira também melhoram com o aumento da temperatura de torrefação.

### 4.3 Comportamento térmico

Na Figura 21 estão apresentadas as curvas de TGA/DTG em atmosfera oxidante (combustão) das amostras de folhas de bananeira não torrificada e torrificadas a 220 °C, 250 °C e 280 °C.

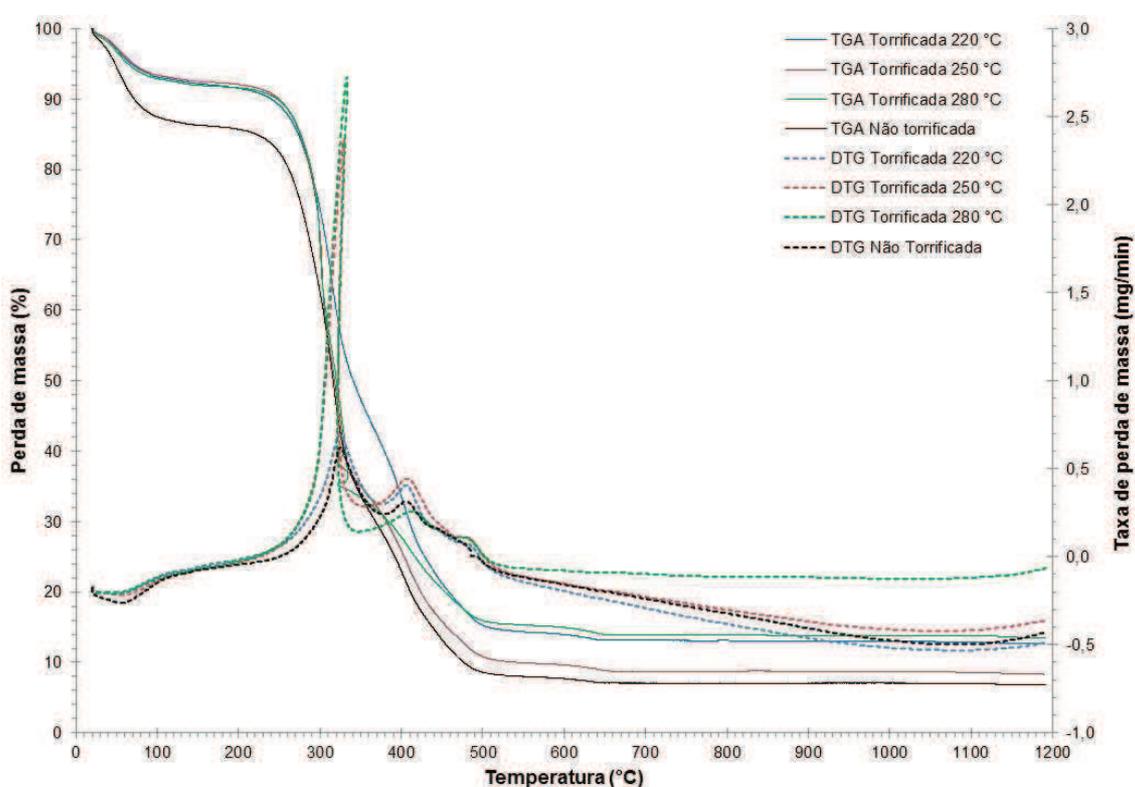


Figura 21: TGA/DTG das amostras de folha de bananeira.

Os resíduos apresentaram três estágios de degradação térmica. O primeiro ocorreu da temperatura ambiente até aproximadamente 245 °C, o qual está relacionado à perda de umidade das amostras. Para as folhas de bananeira não torrificadas a perda de massa foi de 13,2 %, para as folhas torrificadas a 220 °C foi de 7,3 %, para as folhas torrificadas a 250 °C de 6,0 % e para as folhas torrificadas a 280 °C de 5,8 %. Estes valores são próximos aos teores de umidade encontrados por análise aproximada, apresentados anteriormente.

No segundo estágio, compreendido entre 245 e 585 °C, para a folha não torrificada, entre 122 e 537 °C, para a folha torrificada a 220 °C, entre 92 e 535 °C, para a folha torrificada a 250 °C e entre 89°C e 518 °C, para a folha torrificada a 280 °C, ocorreu a maior perda de massa, atribuída à degradação de materiais voláteis e da hemicelulose, celulose e parte da lignina, constituintes das biomassas. As perdas mássicas para as amostras de folhas não torrificadas, torrificadas a 220, 250 e 280 °C foram de 78, 78,5, 79,6 e 80,0 %, respectivamente, corroborando com os valores encontrados por análise aproximada, apresentados anteriormente.

No terceiro estágio, as perdas de massa são relativas à parte da lignina remanescente que se decompõe gradualmente (CHEN *et al.*, 2015c). Os resultados indicam que 91,2 % da folha de bananeira não torrificada se decompõe em até 585 °C e que aproximadamente 85,5 % das folhas torrificadas a 220, 250 e 280 °C se decompõe em até 537 °C.

O comportamento térmico observado para a amostra da folha de bananeira não torrificada foi semelhante ao obtido por Maia (2013) e Fernandes (2012) para o mesmo resíduo. As folhas torrificadas apresentaram comportamentos semelhantes aos observados por Chen *et al.* (2015c), em estudo realizado com o eucalipto e fibra de palma. No estudo realizado por Chen e Kuo (2010) com biomassa de resíduo de madeira, salgueiro, casca de coco e bambu torrificadas a 240 °C observaram maior perda de massa para a faixa de temperatura entre 200 e 500 °C, sendo 71, 70, 58 e 53 %, respectivamente.

Na Figura 22 estão representados os gráficos da análise térmica diferencial (DTA) das amostras de folhas de bananeira não torrificada e torrificadas. Nestes, observam-se eventos endotérmicos que correspondem ao consumo de energia para evaporar a água presente na biomassa. A folha não torrificada apresentou evento endotérmico na faixa de temperatura entre aproximadamente 20 e 120 °C, com um pico máximo em 62 °C.

As folhas torrificadas a 220, 250 e 280 °C apresentaram eventos endotérmicos na mesma faixa de temperatura da folha não torrificada, com picos máximos em 62, 60 e 55 °C, respectivamente. Porém, menos significativos em relação à folha não torrificada, devido ao baixo teor de umidade das amostras torrificadas, como observado anteriormente nos resultados da análise

aproximada. Em estudo realizado por Maia (2013), a casca de arroz *in natura* apresentou também não apresentou um evento endotérmico significativo, devido a pouca umidade que as amostras apresentavam (7,61 %).

De acordo com Maia (2013), Chen *et al.* (2015a) e Polleto *et al.* (2012), os picos exotérmicos correspondem à liberação de energia, devido à degradação térmica das frações de hemicelulose, celulose e lignina, gradativamente. Pode-se observar nas curvas DTA que a biomassa torrificadas apresentaram maiores picos de liberação de energia, sendo que o pico de máxima liberação ocorreu para a amostra torrificada a 280 °C. Em estudo realizado por Protásio (2014) com a casca do coco babaçu, o pico de máxima liberação de energia ocorreu em 329 °C atribuído à combustão da celulose e da hemicelulose por meio da liberação dos materiais voláteis. Posteriormente, ocorreu uma fase de transição da combustão da celulose residual e da lignina, resultando em um pico de menor intensidade. Após essa fase, ocorreu intensa degradação da lignina e oxidação do carbono fixo.

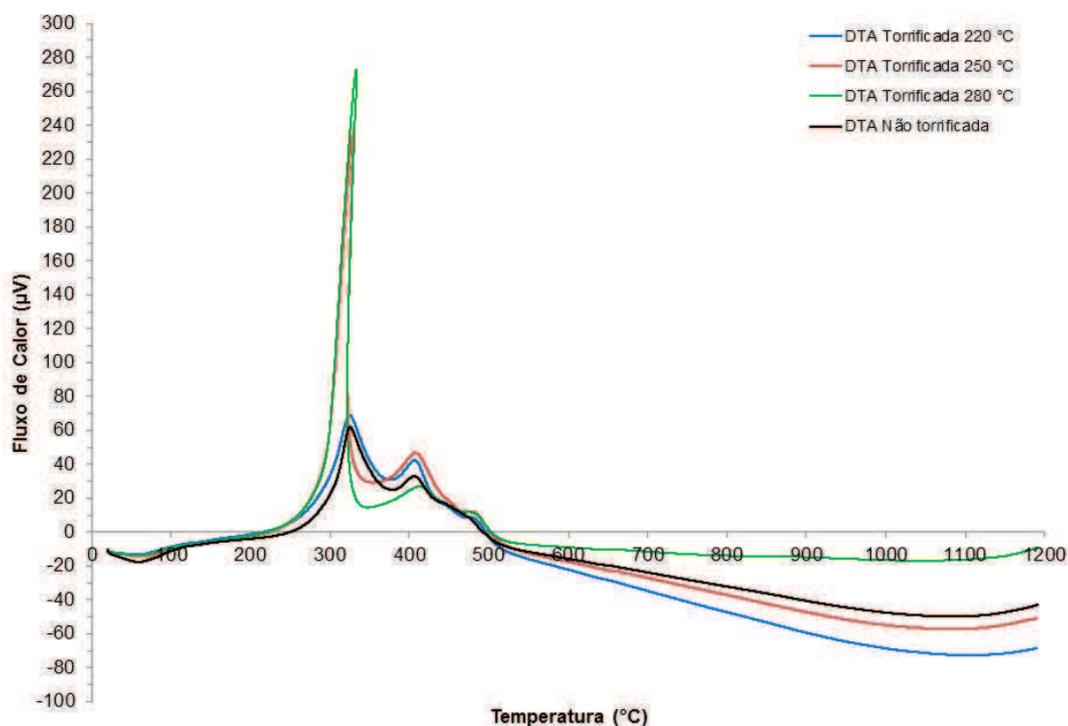


Figura 22: DTA das amostras de folha de bananeira.

Pode-se observar que os picos encontrados nas curvas de DTA são correspondentes àqueles das curvas TGA/DTG (Figura 21), ou seja, à medida

que a amostra perde massa ocorre liberação de energia devido à oxidação dos principais elementos químicos combustíveis (C e H) corroborando com os valores encontrados anteriormente na análise elementar. Observa-se ainda que os picos mais intensos ocorreram para as biomassas torrificadas, mostrando que este tratamento melhora as propriedades energéticas da biomassa e tende a reduzir a geração de gases durante o processo de briquetagem em função da redução do teor de materiais voláteis.

#### 4.4 Compactação, propriedades visco-elásticas e briquetagem das partículas de folhas de bananeira ressecadas

Na Tabela 5, são apresentados os resultados para as propriedades visco-elásticas das partículas de folhas de bananeira não torrificadas com faixa de granulometria maior que 3,50 mm. Os resultados foram avaliados por análise estatística de variância as quais estão apresentados no Anexo I.

Tabela 5: Propriedades visco-elásticas das folhas de bananeira não torrificadas com granulometria maior que 3,50 mm.

Parâmetros de compactação		Propriedades visco-elásticas (valores médios)			
Temperatura [°C]	Pressão [MPa]	Módulo de compactação ( $k_0$ ) [MPa]	Índice de porosidade (b) [Adimensional]	Densidade crítica ( $\rho_c$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]	Densidade final ( $\rho$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]
30	20	0,1268	0,5588	107,4	540
	40	0,1000	0,6100	98,36	601
	60	0,0760	0,6840	87,77	609
120	20	0,0334	0,6880	87,21	583
	40	0,0275	0,7348	81,65	629
	60	0,0184	0,7867	76,26	656

Pode-se verificar que na medida em que a temperatura da matriz aumentou, o módulo de compactação ( $k_0$ ) sofreu uma diminuição substancial, devido ao amolecimento da lignina, a qual diminui as propriedades elásticas do material e o torna mais plástico (TUMULURU *et al.*, 2011 e KALIYAN e MOREY, 2009).

A lignina da biomassa à temperaturas elevadas sofre plastificação e melhora a ligação das partículas. O amolecimento da lignina se inicia com

temperatura acima de 140 °C (TUMULURU *et al.*, 2011; WONGSIRIAMNUAY e TIPPAYAWONG, 2015 e STELTE *et al.*, 2011). De acordo com Nona *et al.*, 2014 outro fator que pode contribuir para a diminuição do módulo de compactação é a redução no teor de umidade das partículas com o aumento da temperatura no processo de compactação.

O aumento da pressão final também contribuiu para a diminuição do módulo de compactação, contudo em menor grau que a temperatura. O efeito da pressão sobre o módulo de compactação ( $k_0$ ) deve-se, principalmente, à diminuição da elasticidade do material por efeito mecânico nas fibras da biomassa. Com o aumento da pressão na matriz, o percentual de fração de volume de vazios no briquete diminui (NDIEMA *et al.*, 2002). A folha de bananeira possui o valor do módulo de compactação baixo se comparado ao encontrado pela empresa Ecodevices (2015) em estudos realizados com a serragem de eucalipto (2,085 MPa) para 30 °C e 60 MPa. Esse menor valor pode estar relacionado ao grande número de espaços vazios presentes nas folhas da bananeira, devido ao tamanho da partícula e quantidade de material fibroso presente.

Segundo Faborode e Ocallaghan (1986), o índice de porosidade ( $b$ ) representa o estado final de compactação do material. Na medida em que a pressão e a temperatura aumentam o índice de porosidade aumenta. Esse comportamento foi observado para as folhas de bananeira, pois na medida em que a pressão e a temperatura aumentaram o índice de porosidade aumentou.

A densidade crítica está relacionada ao ponto de compactação das partículas. No início do processo de compactação há espaços vazios suficientes para as partículas do material se moverem, dificultando a aglomeração. No decorrer do processo, como o ar é expulso, as partículas ficam mais próximas e começam a apresentar resistência mais elástica. Este é o ponto em que as “pastilhas” e briquetes começam a ser formados. Quanto maior for este valor, mais facilmente se formará o briquete e melhor será a sua qualidade (FABORODE e O'CALLAGHAN, 1986). A densidade crítica obtida para a folha de bananeira com faixa de granulometria maior que 3,50 mm foi baixa (87,7 kg/m<sup>3</sup>) quando comparada à obtida pela empresa Ecodevices (2015) para a serragem de eucalipto compactado a 30 °C e 60 MPa de 204 kg/m<sup>3</sup>.

A temperatura apresentou menor influência na densidade final do que a pressão final. Por exemplo, para a mesma temperatura de 30 °C, o aumento da pressão final de 20 para 60 MPa proporcionou um aumento da densidade final de 12,8 %. Com o aumento da temperatura de 30 °C para 120 °C, o aumento da densidade final foi de 7,7 % para uma pressão final de 60 MPa.

Com o aumento da temperatura a energia de compactação diminuiu em proporções maiores que a taxa de compressão final, conforme mostrado na Tabela 6. A temperatura influencia essencialmente no processo energético da compactação e não no processo físico de aglomeração das partículas da biomassa. Uma explicação provável para isto é que temperaturas mais elevadas ocasionam menor resistência do material à compactação devido ao menor atrito e melhora a fluidez do material, exigindo menores forças para sua compactação (LARSSON *et al.*, 2013). As partículas de folhas de bananeira requereram baixa energia para sua compactação comparada a encontrada pela empresa Ecodevices (2015) em estudos realizados com a serragem de eucalipto (421 J) para 30 °C e 60 MPa.

Tabela 6: Energia de compactação das partículas de folhas de bananeira com granulometria maior que 3,50 mm.

Temperatura [°C]	Pressão [MPa]	Energia de compactação ( $E_c$ ) [J]	Taxa de compressão final ( $r$ ) [Adimensional]
30	20	63	8,8
	40	94,8	10,1
	60	119,12	10,2
120	20	43	9,5
	40	65,3	10,8
	60	87,81	10,9

Na Figura 23 é mostrado o efeito da temperatura na taxa de compressão da biomassa. Observa-se que no início da compactação, a pressão se mantém em zero até atingir a taxa de compressão igual a quatro, o que pode ser devido a baixa densidade do material. Verifica-se que para uma mesma taxa de compressão, a pressão necessária para compactação da biomassa foi substancialmente menor para temperatura maior. Esse comportamento foi semelhante ao observado por Stelte *et al.* (2011), na compactação de resíduo

de faia a 60 °C e 40 MPa. Com o aumento da temperatura para 140 °C, a pressão necessária para a compactação diminuiu para 10 MPa.

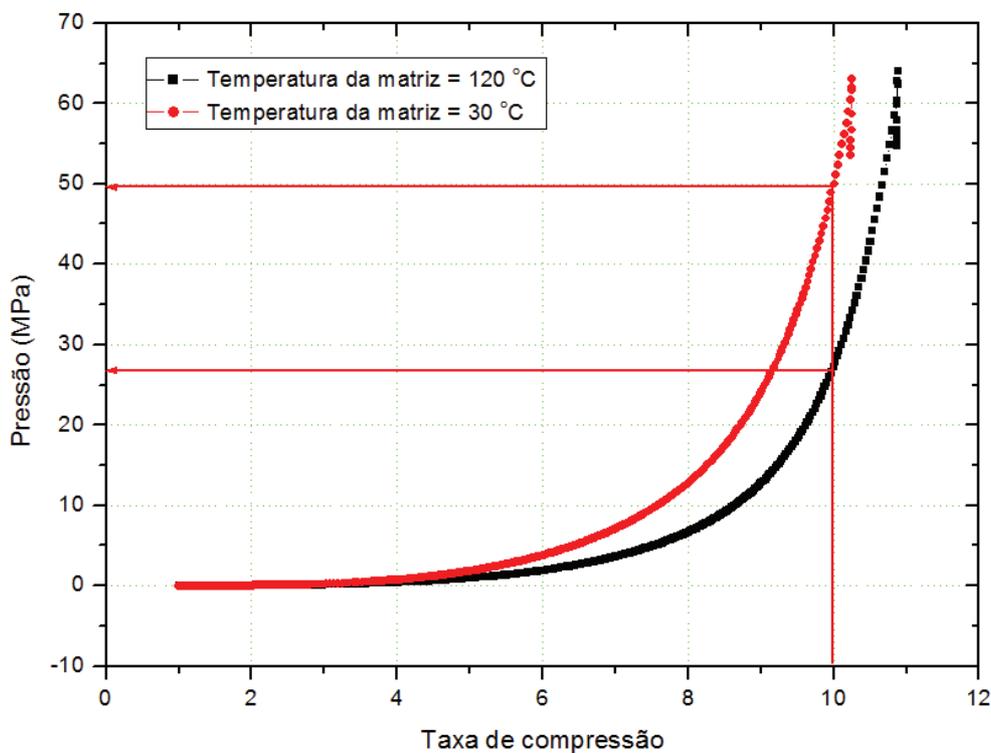


Figura 23: Efeito da temperatura na curva de compactação das folhas de bananeira.

Na Figura 24, pode-se observar os resultados obtidos na produção dos briquetes utilizando a matriz com ângulo de entrada de 8°. A matriz com ângulo de entrada de 7° não chegou a formar briquete e utilizando a matriz com ângulo de entrada de 15° houve elevação da pressão dentro da câmara de extrusão ocasionando explosões e o trancamento da rosca de alimentação. O melhor resultado apresentado durante os testes foi utilizando a matriz com ângulo de entrada de 8° e temperatura de aquecimento da matriz de 350 °C, porém não se conseguiu produzir briquetes de qualidade com a biomassa de folha de bananeira ressecada com granulometria maior.



Figura 24: Resultado da produção briquetes de folhas de bananeira com granulometria maior que 3,50 mm em extrusora empregando matriz com ângulo de 8°.

O principal problema encontrado durante a produção dos briquetes foi a geração de muitos gases no interior da matriz, que pode estar relacionado à carbonização dos materiais voláteis presentes no primeiro estágio de degradação térmica que ocorreu da temperatura ambiente até aproximadamente 145 °C, como visto nas curvas de TGA. Até aproximadamente 100 °C ocorre a vaporização da água presente no material sob condições de alta pressão. Além disso, a formação do briquete não foi uniforme, o que pode ser devido a baixa densidade crítica do material em função do excesso de fibras presentes na biomassa triturada, como observado na análise granulométrica, e também à sua baixa densidade inicial (60 kg/m<sup>3</sup>).

Visando melhorar a qualidade dos briquetes produzidos, foi reduzido o tamanho da partícula, com o objetivo de aumentar a densidade inicial, reduzir o excesso de fibras presentes na biomassa e os espaços vazios entre as partículas de biomassa, aumentar o valor da densidade crítica e, conseqüentemente, melhorar a qualidade dos briquetes.

Na Tabela 7, são apresentados os resultados para as propriedades visco-elásticas das partículas de folhas de bananeira não torrificada com granulometria menor que 1,70 mm.

Utilizando partículas com granulometria menor, houve variação estatisticamente significativa ( $p < 0,05$ ) no comportamento da biomassa na compactação, mostrando que a redução do tamanho da partícula afeta o módulo de compactação para temperatura de 120 °C, devido à diminuição dos espaços vazios entre as partículas. Esse comportamento foi observado por

Castellano *et al.* (2015) em seus estudos utilizando resíduos de pinus, eucalipto, palha de arroz, palha de aveia, entre outros, triturados em peneira de 2 e 4 mm. Para os resíduos com partículas menores, houve a redução dos espaços vazios entre as partículas de biomassa influenciando no aumento da densidade final. Por exemplo, para 120 °C e 60 MPa, o aumento foi de 7,2 %.

Tabela 7: Propriedades visco-elásticas das folhas de bananeira não torrificada com granulometria menor que 1,70 mm.

Parâmetros de compactação		Propriedades visco-elásticas (valores médios)			
Temperatura [°C]	Pressão [MPa]	Módulo de compactação ( $k_c$ ) [MPa]	Índice de porosidade ( $b$ ) [Adimensional]	Densidade crítica ( $\rho_c$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]	Densidade final ( $\rho$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]
30	20	0,1789	0,8726	122,9	668
	40	0,1015	1,0067	106,5	741
	60	0,0634	1,0889	98,5	784
120	20	0,0061	1,5144	70,8	703
	40	0,0012	2,1622	49,6	659
	60	0,0003	2,4191	44,3	686

A variação no tamanho das partículas afetou a densidade crítica, porém, o valor continua baixo, comparado com os valores encontrados para a serragem de eucalipto citado anteriormente, resultando em briquetes de baixa qualidade. Na Figura 25 estão mostrados os briquetes produzidos no ensaio de compactação com as folhas de bananeira com as diferentes granulometrias.

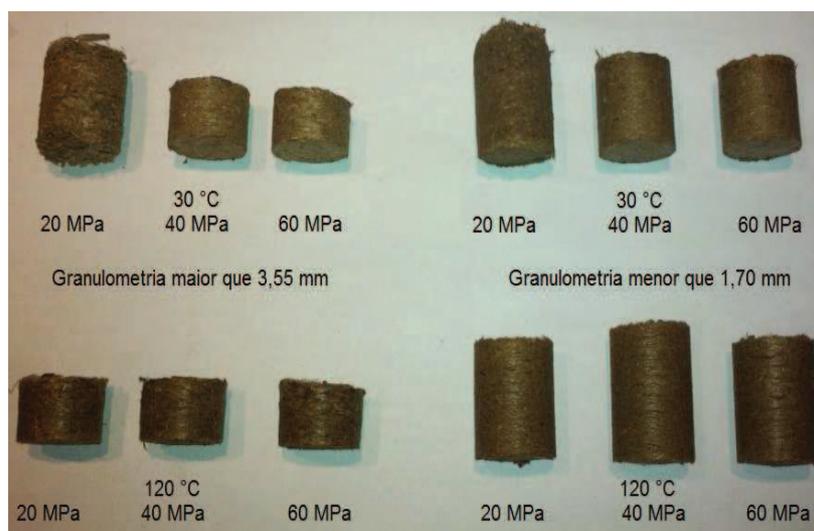


Figura 25: Briquetes produzidos durante o ensaio de compactação com diferentes granulometrias de folha de bananeira.

Na Tabela 8 estão apresentados os valores da energia de compactação e taxa de compressão final para partículas com menor granulometria.

Tabela 8: Energia de compactação das partículas de folhas de bananeira com granulometria menor que 1,70 mm.

Temperatura [°C]	Pressão [MPa]	Energia de compactação (E <sub>c</sub> ) [J]	Taxa de compactação final (r) [Adimensional]
30	20	86,5	6,2
	40	117,0	6,9
	60	138,6	7,3
120	20	41,0	6,6
	40	67,5	6,2
	60	83,0	6,4

Houve variação estatisticamente significativa ( $p < 0,05$ ) no valor da energia de compactação obtidas nas diferentes pressões de compactação empregadas para temperatura de 30 °C, o que deve estar relacionado à baixa fluidez do material em virtude da baixa temperatura, exigindo um maior gasto energético do equipamento para realizar a briquetagem. Para temperatura de 120 °C, não houve variação estatisticamente significativa entre os valores de energia gasta para a compactação. Quanto maior a temperatura do material durante a compactação, maior a sua fluidez decorrente da plastificação da lignina (THEERARATTANANOON *et al.*, 2011). Este mesmo comportamento foi observado por Castellano *et al.* (2015) com pinheiro triturado com partículas de 4 e 2 mm, cujas energias consumidas na compactação foram de 2,2 kJ e 2,3 kJ, respectivamente. A diminuição do tamanho da partícula também afetou de forma significativa o valor da taxa de compressão final.

Na Figura 26 e 27, pode-se observar os resultados obtidos na produção dos briquetes referentes ao segundo ensaio, com partículas de menor faixa de granulometria. A briquetagem foi realizada utilizando a matriz com ângulo de entrada de 8°, pois esta apresentou melhor resultado no primeiro ensaio. Os parâmetros de processo (temperatura e velocidade) foram os mesmos utilizados anteriormente.

O resultado do segundo ensaio foi um pouco melhor comparado com o primeiro, porém não foi possível obter briquetes de qualidade. A produção dos briquetes foi descontinuada o que pode ser devido à baixa densidade crítica,

mesmo com a redução significativa na quantidade de fibras presentes nas partículas e com o aumento da densidade inicial ( $107 \text{ kg/m}^3$ ). Houve geração de muitos gases no interior da matriz, como no primeiro ensaio. Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que partículas menores tendem a gerar briquetes de melhor qualidade.



Figura 26: Produção dos briquetes de folhas de bananeira em extrusora empregando matriz com ângulo de entrada de  $8^\circ$ .



Figura 27: Briquetes de folhas de bananeira com granulometria menor que  $1,70 \text{ mm}$  produzidos em extrusora empregando matriz com ângulo de  $8^\circ$ .

#### 4.5 Compactação e propriedades visco-elásticas das partículas de folhas de bananeira torrificadas

Como as folhas de bananeira com granulometria menor apresentaram um melhor resultado em relação as folhas com granulometria maior, decidiu-se fazer a torrefação e avaliar as propriedades visco-elásticas da folha de bananeira torrificada, afim de verificar se há melhora nessas propriedades. Na Tabela 9, estão apresentados os resultados das propriedades visco-elásticas da biomassa torrificada sob diferentes temperaturas e pressão. Os resultados foram avaliados por análise estatística de variância as quais estão apresentados no Anexo II.

Tabela 9: Propriedades visco-elásticas das folhas de bananeira torrificadas com granulometria menor que 1,70 mm.

Biomassa	Parâmetros de compactação		Propriedades visco-elásticas (valores médios)			
	Temperatura [°C]	Pressão [MPa]	Módulo de compactação ( $k_c$ ) [MPa]	Índice de porosidade (b) [Adimensional]	Densidade crítica ( $\rho_c$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]	Densidade final ( $\rho$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]
Torrificada 220 °C	30	20	0,2538	0,7414	154,4	746
		40	0,2687	0,7118	160,8	865
		60	0,3392	0,8064	141,9	818
	120	20	0,2467	0,8777	130,4	670
		40	0,3049	0,8963	127,7	728
		60	0,2231	0,9631	118,8	771
Torrificada 250 °C	30	20	0,3524	0,9555	128,3	637
		40	0,5426	0,9298	131,8	683
		60	0,5342	0,8784	139,6	766
	120	20	0,3426	0,9693	126,5	635
		40	0,3776	0,9831	124,7	703
		60	0,4014	0,9739	125,9	765
Torrificada 280 °C	30	20	0,5554	0,9728	133,0	607
		40	0,6397	0,8899	145,4	717
		60	0,8369	0,8941	144,7	735
	120	20	0,3117	1,0145	127,5	664
		40	0,3546	1,0224	126,5	729
		60	0,3287	1,0357	124,9	784

Os resultados mostraram que a torrefação afetou de forma significativa o módulo de compactação, o índice de porosidade e a densidade crítica. O aumento do módulo de compactação, ocorreu em função da redução dos

espaços vazios entre as partículas, mostrando que a torrefação ajuda a melhorar esta propriedade. Conforme dados obtidos em estudos realizados pela empresa Ecodevices (2015) com diferentes biomassas, quanto mais próximo de 1 estiver o valor do índice de porosidade, maior facilidade de aglomeração terá o material. Para a biomassa torrificada, os valores do índice de porosidade ficaram mais próximos de 1 do que para a biomassa não torrificada.

O valor de densidade crítica melhorou substancialmente em relação a biomassa não torrificada, o que leva à produção de briquetes de melhor qualidade. Houve efeito significativo da torrefação e aumento da pressão na densidade final para os briquetes produzidos com temperatura de 30 °C. Essa tendência de diminuição no valor da densidade final como aumento da temperatura de torrefação foi observado por Paula (2014), em seus estudos com sabugo de milho, casca de coco e bagaço de cana torrificadas a 180 e 200 °C e isso ocorreu devido à alteração que ocorre no material com o tratamento térmico. Conforme Paula (2014), a lignina, principal aglutinante da biomassa, começa a sofrer degradação térmica próximo a 240 °C. Para temperatura de 120 °C, a pressão sofre efeito significativo, sendo que os valores da densidade final aumentam com o aumento da pressão.

Os valores de densidade final estão próximos aos encontrados por outros autores. Protásio *et al.* (2012) encontraram valores de 866 e 855 kg/m<sup>3</sup> para a casca e pergaminho de café torrificadas a 250 °C com taxa de aquecimento de 1,5 e 3,0 °C/min, respectivamente. Paula (2014), encontrou valores de 969 e 832 kg/m<sup>3</sup> para o sabugo de milho e bagaço de cana torrificadas a 200 °C, respectivamente. Produtos de alta densidade são vantajosos do ponto de vista de transporte, armazenamento e manuseio devido à otimização e à logística do processo (PROTÁSIO *et al.*, 2012).

O valor da densidade inicial aumentou em média de 6 % quando submetida a biomassa ao processo de torrefação. Os valores encontrados após a torrefação foi de 114,5, 122,6 e 129,4 kg/m<sup>3</sup> para as biomassas torrificadas a 220, 250 e 280 °C, respectivamente. Este aumento foi em função da maior perda mássica observada na curva TGA causada pela redução do teor de umidade e materiais voláteis. Na Figura 28 estão mostrados os briquetes produzidos durante o ensaio de compactação com as biomassas torrificadas.

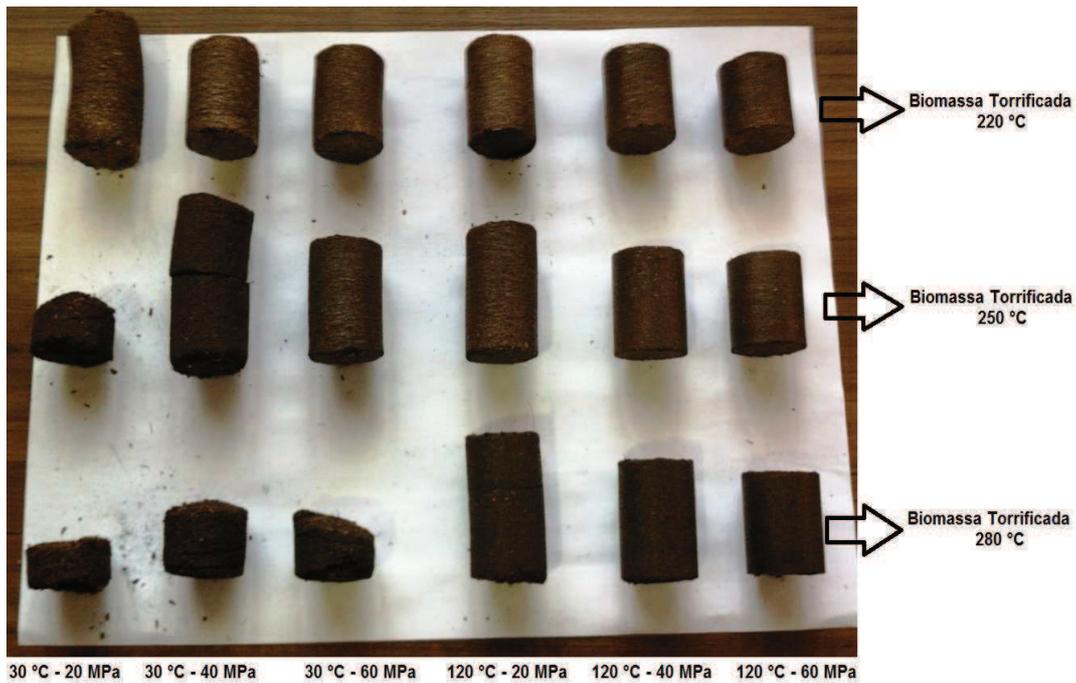


Figura 28: Briquetes produzidos com biomassa torrificada durante ensaio de compactação.

Durante a torrefação das biomassas em temperaturas de 250 ° e 280 °C (Figura 29), houve formação de carvão. Isso mostrou que essas temperaturas são muito elevadas para a torrefação da folha de bananeira.



Figura 29: Carvão formado durante a torrefação com temperaturas de 250 e 280 °C.

Na Tabela 10 estão os valores da energia de compactação e taxa de compressão final das amostras torrificadas.

Tabela 10: Energia de compactação e taxa de compressão para as folhas de bananeira torrificadas.

Biomassa	Temperatura [°C]	Pressão [MPa]	Energia de compactação (E <sub>c</sub> ) [J]	Taxa de compactação final (r) [Adimensional]
Torrificada 220 °C	30	20	88,8	6,5
		40	138,9	7,6
		60	204,8	7,2
	120	20	92,0	5,9
		40	163,5	6,4
		60	190,2	6,7
Torrificada 250 °C	30	20	104,5	5,2
		40	194,6	5,6
		60	249,6	6,3
	120	20	106,3	5,2
		40	173,4	5,7
		60	248,1	6,2
Torrificada 280 °C	30	20	125,9	4,7
		40	206,4	5,5
		60	297,4	5,7
	120	20	103,5	5,1
		40	171,9	5,6
		60	221,2	6,1

Da Tabela 10, verifica-se que para temperaturas de 30 e 120 °C, a torrefação e o aumento da pressão de compactação afetaram significativamente a energia de compactação e a taxa de compressão. O aumento da temperatura influencia essencialmente no processo energético e não no processo físico de aglomeração, como pode ser visto pela pequena variação nos valores da taxa de compressão.

Os valores da energia de compactação para as biomassas torrificadas foram maiores quando comparados com os da biomassa não torrificada. Isso mostra que utilizando a biomassa torrificada haverá um maior gasto energético para a compactação, porém a qualidade do briquete produzido (poder calorífico, densidade energética) será melhor. Com o aumento da pressão, pode-se observar que a taxa de compressão aumenta, conseqüentemente, o briquete produzido terá uma maior compactação e maior resistência mecânica.

Com a torrefação da biomassa houve melhora nas propriedades visco-elásticas, mostrando-se uma alternativa para a produção de briquetes de qualidade utilizando extrusora briquetadeira. Entre as três temperaturas estudadas, a torrefação a 220 °C foi a que apresentou os melhores resultados.

Quanto maior a pressão de compactação, melhor será a qualidade do briquete produzido.

#### 4.6 Análise da densidade aparente e energética das folhas de bananeira e dos briquetes

Visando à utilização energética dos combustíveis de biomassa, é desejável alta densidade energética, ou seja, maior quantidade de energia por unidade de volume do material (PROTÁSIO, 2012). Nas Tabelas 11 e 12 estão os valores da densidade aparente e energética das folhas de bananeira e dos briquetes produzidos durante os ensaios de compactação.

Tabela 11: Densidade aparente e energética das folhas de bananeira.

<b>Biomassa</b>	<b>Densidade aparente (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade energética (MJ/m<sup>3</sup>)</b>
Não torrificada	107,3	1673,7
Torrificada 220 °C	114,5	2072,7
Torrificada 250 °C	122,6	2412,0
Torrificada 280 °C	129,4	2418,6

O processo de torrefação ocasionou aumento na densidade energética das amostras de folhas de bananeira, como pode ser observado na Tabela 11. Para a biomassa torrificada a 220 °C, o aumento foi de 23,8 %, enquanto que para a biomassa torrificada a 250 e 280 °C foi de 44,1 e 44,5 %, respectivamente. Kim *et al.* (2015) em seu estudo, observaram que o conteúdo energético da biomassa torrificada aumentou entre 5,09 a 13,62 %, comparando com o conteúdo energético da biomassa não torrificada.

Na Tabela 12, pode-se observar que a densidade energética aumentou a medida que a temperatura de torrefação e a pressão aumentaram. Com a briquetagem, houve aumento no valor da densidade aparente acarretando aumento no valor da densidade energética.

Tabela 12: Densidade aparente e energética dos briquetes.

<b>Biomassa</b>	<b>Temperatura [°C]</b>	<b>Pressão [MPa]</b>	<b>Densidade aparente [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Densidade energética [MJ/m<sup>3</sup>]</b>
Não Torrificada	30	20	668	10.416,0
		40	741	11.554,4
		60	784	12.233,8
	120	20	703	10.957,6
		40	659	10.284,1
		60	686	10.697,6
Torrificada 220 °C	30	20	746	13.502,6
		40	865	15.659,1
		60	818	14.805,6
	120	20	670	12.133,1
		40	728	13.179,4
		60	771	13.957,3
Torrificada 250 °C	30	20	637	12.533,5
		40	683	13.429,3
		60	766	15.063,6
	120	20	635	12.493,2
		40	703	13.830,2
		60	765	15.044,1
Torrificada 280 °C	30	20	607	11.340,2
		40	717	13.400,3
		60	735	13.737,8
	120	20	664	12.401,4
		40	729	13.633,9
		60	784	14.651,6

Verifica-se que a torrefação contribui para o processo de compactação, aumentando o poder calorífico e reduzindo o teor de umidade como observado anteriormente, aumentando assim a densidade energética do briquete. O aumento observado foi de 25,9, 24,8 e 20,0 % (valor médio) para a biomassa torrificada em 220, 250 e 280 °C, respectivamente. Esse mesmo comportamento foi observado por Benavente e Fullana (2015) em seus estudos com resíduos da fabricação de azeite. O aumento da densidade energética dos briquetes foi cerca de 232, 237 e 242 % para os resíduos torrificadas com temperatura de 200, 250 e 300 °C, respectivamente.

Assim, é possível afirmar que o processo de torrefação agrega potencial energético à biomassa padrão, com impacto direto na qualidade do briquete.

## CONCLUSÃO

Com a torrefação houve redução significativa no teor de umidade (45,7 %). Houve redução nos teores de materiais voláteis (15,3 %) e aumento nos teores de cinza (40,7 %) e carbono fixo (62,6 %) o que é indicado para melhor combustão. O teor de carbono aumentou aproximadamente 16,4 %, os teores de enxofre, hidrogênio sofreram pouca influência com a torrefação e o teor de nitrogênio aumentou de 0,52 % para 1,15 % (valor médio). O teor de oxigênio sofreu redução de 26,3 % e houve aumento de 25,8 % no poder calorífico superior das folhas torrificadas, ficando em torno de 19,0 e 20,7 MJ/kg.

A redução do tamanho das partículas de folha de bananeira entre 10,0 e 3,50 mm para menores que 1,70 mm utilizadas na produção dos briquetes contribuiu para a redução na quantidade de fibras presentes na folha triturada, diminuindo a quantidade de espaços vazios entre as partículas durante a compactação e aumentando a densidade final do briquete. O valor da densidade crítica continuou baixo com a redução do tamanho das partículas, o que afetou diretamente na qualidade final (ausência de rachaduras, resistência mecânica, uniformidade) do briquete produzido em extrusora.

O aumento da temperatura de compactação de 30 para 120 °C reduziu em média 16,5 % a energia necessária para compactação, porém não influenciou o processo físico de aglomeração. O aumento da pressão contribuiu principalmente na obtenção de briquetes mais densos.

A torrefação das folhas de bananeira promoveu redução nos teores de materiais voláteis na biomassa, ocasionando a diminuição dos gases gerados durante a produção dos briquetes em extrusora com matriz aquecida. A densidade energética do briquete aumentou em média 23,6 % com a torrefação. Dentre as três temperaturas de torrefação avaliadas (220, 250 e 280 °C), apenas a de 220 °C foi indicada para o processo de compactação.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ❖ Avaliar a resistência mecânica dos briquetes produzidos em escala de laboratório com partículas de biomassa com tamanhos menores que 1,70 mm torrificadas a 220 °C;
- ❖ Testar matrizes com ângulo de entrada maior que 8° e menor que 15° utilizando folhas ressecadas com granulometria menor que 1,70 mm;
- ❖ Realizar a combustão dos briquetes obtidos de folhas de bananeira torrificadas a 220 °C e não torrificadas de maneira controlada e analisar as emissões geradas durante a queima;
- ❖ Realizar balanço de energia e análise de viabilidade econômica da produção de briquetes de folhas de bananeira;
- ❖ Levantar as possibilidades de uso dos briquetes de folha de bananeira em diferentes setores consumidores, tais como: pizzarias com forno a lenha, fornalhas industriais e hospitalares entre outros.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM - Annual book of ASTM standards: E828-81. Standard Test Method for Designating the Size of RDF-3 From its Sieve Analysis, 2004.

\_\_\_\_\_. E 871-82. Standard Test Method Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels, 2006.

\_\_\_\_\_. E 872-82. Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels, 2006.

\_\_\_\_\_. E 1755-01. Standard Test Method for Ash in Biomass, 2007.

BELLO, R. H.; LINZMEYER, P.; FRANCO, C. M. B.; SOUZA, O.; SELLIN, N.; MEDEIROS, S. H. W.; MARANGONI, C. Pervaporation of ethanol produced from banana waste. *Waste Management*, v. 34, n° 8, p.1501–1509, 2014.

BELLO, R. S.; ONILUDE, M. A.; ADEGBULUGBE, T. A. Extrudate characteristics produced from high density screw-type extruder machine. *International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy*, v. 54, p. 88, 2015.

BHATTACHARYA, S. Biomass energy and densification: A global review with emphasis on developing countries, proceedings of the first world conference on pellets: 1-17. Estocolmo, 2 a 4 de Setembro de 2002.

BHATTACHARYA, S. C.; SETT, S.; SHRESTHA, R. M. State of the art for biomass densification. *Energy Sources*, New York, v. 11, n. 3, p. 161-182, 1989.

BENAVENTE, V.; FULLANA, A. Torrefaction of olive mill waste. *Biomass and bioenergy*, v. 73, p.186 -194, 2015.

CASTELLANO, J.M.; GÓMEZ, M.; FERNÁNDEZ, M.; ESTEBAN, L.S.; CARRASCO, J.E. Study on the effects of raw materials composition and pelletization conditions on the quality and properties of pellets obtained from different woody and non woody biomasses. *Fuel*, v. 139, p. 629–636, 2015.

CEPA - Centro de Socioeconômica e Planejamento Agrícola, Epagri, Santa Catarina Santa Catarina. Síntese Anual da Agricultura de Santa Catarina 2014-2015. Disponível em: < [http://docweb.epagri.sc.gov.br/website\\_cepa/publicações/Sintese\\_2015.pdf](http://docweb.epagri.sc.gov.br/website_cepa/publicações/Sintese_2015.pdf) > Acesso 02/2016.

CHEN, D.; LIU, D.; ZHANG, H.; CHEN, Y. Effect of Torrefaction Temperature on Biomass Pyrolysis Using TGA and Py-GC/MS. *Asia-Pacific Energy Equipment Engineering Research Conference*, Atlantis Press, 2015a.

CHEN, D.; ZHENG, Z., FU; K., ZENG, Z.; WANG, J.; LU, M. Torrefaction of biomass stalk and its effect on the yield and quality of pyrolysis products. *Fuel*, v.159, p. 27–32, 2015b.

CHEN, W-H.; PENG, J.; XIAOTAO T. B. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy* v 44, p. 847–866, 2015c.

CHEN, W-H., KUO, P.C. Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass. *Energy*, v.36, p.803-811, 2011.

CHEN, W-H.; KUO, P-C. A study on torrefaction of various biomass materials and its impact on lignocellulosic structure simulated by a thermogravimetry. *Energy*, v.35, p. 2580-2586, 2010.

CLEXTRAL. Pré-tratamento da biomassa. Disponível em: <http://www.clextral.com/pt-br/green-industries-2/biomassa/>. Acesso em 11/2015.

ECODEVICES. Disponível em <<http://ecodevices.com.br/>>. Acesso 07/2015.

FABORODE, M. O.; O'CALLAGHAN, J. R. Theoretical analysis of the compression of fibrous agricultural material. *Journal of Agricultural Engineering Research*, London, v 35, n 3, p. 175-191, 1986.

FAIZAL, H. M.; LATIFF, Z. A.; ISKANDAR, M. A. M. Characteristics of binderless palm biomass briquettes with various particle sizes. *Jurnal Teknologi*, v. 77, n. 8, p. 1-5, 2015.

FEDERIZZI, M. Potencialidade do uso de resíduos lignocelulósicos da Bananicultura como substrato de fermentação do processo de Metanização. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos). Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE – Joinville, 2008.

FELFLI, F. F. Torrefação de biomassa, viabilidade técnica e potencial de mercado. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP - Campinas, 2003.

FELFLI F.F; LUENGO C.A.; SUAREZ J.A.; BEATON P.A. Wood briquette torrefaction. *Energy Sustain*, v 9, p. 19–22, 2005.

FERNANDES, E. R. K. Valorização de resíduos gerados na bananicultura por pirólise. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos). Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE – Joinville, 2012.

FILIPPETTO, D. Briquetagem de resíduos vegetais: viabilidade técnico-econômica e potencial de mercado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP - Campinas, 2008.

GABHANE, J.; WILLIAM, S. P.; GADHE, A.; RATH, R.; VAIDYA, A. N.; WATE, S. Pretreatment of banana agricultural waste for bio-ethanol production: Individual and interactive effects of acid and alkali pretreatments with autoclaving, microwave heating and ultrasonication. *Waste management*, v. 34, n. 2, p. 498-503, 2014.

GARCIA, R.; PIZZARO, C.; LAVÍN, A. G.; BUENO, J. L. Characterization of spanish biomass wastes for energy use. *Bioresource Technology*, v. 103, p. 249-258, 2012.

GIL, M. V.; GARCÍA, R.; PEVIDA, C.; RUBIERA, F. Grindability and combustion behavior of coal and torrefied biomass blends. *Bioresource technology*, v. 191, p. 205-212, 2015.

GILBERT, P.; RYU, C.; SHARIF, V.; AND SWITCHENBANK, J. Effect of processing parameters on pelletisation of herbaceous crops. *Fuel*, v. 88, p.1491-1497, 2009.

GROVER, P. D.; MISHRA, S. K. Biomass Briquetting: technology and practices, Bangkok: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1996.

HOPFNER, S. A. Produção de etanol por diferentes espécies de micro-organismos a partir de mostos de cascas de banana (frescas ou sacarificadas) com diferentes concentrações de açúcares redutores. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos). Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE – Joinville, 2015.

HOUSAGUL, S.; SIRISUKPOKA, U.; BOONYAWANICH, S.; PISUTPAISAL, N. Biomethane Production from Co-Digestion of Banana Peel and Waste Glycerol. *Energy Procedia*, v. 61, p. 2219-2223, 2014.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE ESTATÍSTICA E GEOGRAFIA. LEVANTAMENTO. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. Rio de Janeiro. v. 29 n. 3 p.1-81. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatística/indicadores/agropecuária/lspa/default.shtm>> Acesso em 05/ 2015.

KALIYAN, R. N.; MOREY, V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, v. 33, p. 337-359, 2009.

KATHURIA R.S.; GROVER S. Using agricultural residues as a biomass briquetting: an alternative source of energy. *Journal of Electrical and Electronics Engineering*. v. 1, p. 11-15, 2012.

KIM, Y-H, NA, B., AHN, B-J, LEE, H-W., LEE, J-W. Optimal condition of torrefaction for high energy density solid fuel of fast growing tree species. *Korean Journal of Chemical Engineers*, v. 32, n 8, p. 1547-1553, 2015.

KROHL, D.; R. Pirólise rápida de folhas de bananeira em reator de leito fluidizado. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos). Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE – Joinville, 2014.

LARSSON, S. H., RUDOLFSSON, M., NORDWAEGER, M., OLOFSSON, I., SAMUELSSON, R. Effects of moisture content, torrefaction temperature, and die temperature in pilot scale pelletizing of torrefied Norway spruce. *Applied Energy*, v.102, p. 827–832, 2013.

LIPPEL. Disponível em: <<http://www.lippel.com.br/br>>. Acesso em 05/2015.

MACHIN, E. B. Análise técnica, econômica e ecológica da incorporação de sistemas de gaseificação de bagaço de cana-de-açúcar no setor sucroalcooleiro: uso de ciclos combinados para o aumento da oferta de eletricidade. Tese (Doutorado). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - Guaratinguetá, 2015.

MAIA, B. G. O. Valorização de resíduos da bananicultura e da rizicultura na produção de briquetes. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos). Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE – Joinville, 2013.

MATÚŠ, M; KRIŽAN, P.; ŠOOŠ, L.; BENIAK, J. Effects of Initial Moisture Content on the Physical and Mechanical Properties of Norway Spruce Briquettes. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, v. 9, n. 10, p. 1156-1162, 2015.

MORAIS, M. R.; SEYE, O; FREITAS, K. T.; RODRIGUES M.; DOS SANTOS, E. C. S.; SOUZA, R. C. R. Obtenção de briquetes de carvão vegetal de cascas de arroz utilizando baixa pressão de compactação. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, An. 6, 2006, Campinas. Disponível online: [http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022006000200019&script=sci\\_arttext](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022006000200019&script=sci_arttext), Acesso em 04/15.

MORAN, M.J.; SHAPIRO, H.N. Princípios de Termodinâmica para Engenharia. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

MOTGHARE, K. A.; RATHOD, A. P.; WASEWAR, K. L.; LABHSETWAR, N. K. Comparative study of different waste biomass for energy application. Waste Management, Available online 21 August 2015.

NARANJO, J.M.; CARDONA, C.A.; HIGUITA, J.C. Use of residual banana for polyhydroxybutyrate (PHB) production: Case of study in an integrated biorefinery. Waste Manage, v. 34, n. 12, p. 2634-2640, 2014.

NDIEMA, C. K. W.; MANGA, P. N.; RUTTOH, C. R. Influence of die pressure on relaxation characteristics of briquetted biomass. Energy Conversion and Management, v. 43, p. 2157-2161, 2002.

NONA, K. D.; LENAERTS, B.; KAYACAN, E.; SAEYS, W. Bulk compression characteristics of straw and hay. Biosystems engineering, v. 118, p.194-202, 2014.

OBERNBERGER, I.; THEK, G. Physical Characterization and Chemical Composition of Densified Biomass Fuels with regard to their Combustion Behavior. Biomass and Bio-energy, v. 27, p. 653-669, 2004.

OBERNBERGER, I.; THEK, G. The pellet handbook: The production and thermal utilization of pellets. London: Earthscan, 593 p., 2010.

OHM, T-I.; CHAE, J-S.; KIM, J-K., OH, S-C. Study on the characteristics of biomass for co-combustion in coal power plant. Journal of Material Cycles and Waste Management, v 17, p. 249–257, 2015.

OLADEJI, J. T. Theoretical Aspects of Biomass Briquetting: A Review Study. Journal of Energy Technologies and Policy. V. 5, n.3, 2015.

OLIVEIRA, C. M. Energia Renovável, 2011. Disponível em: <http://pt.calameo.com/read/00020096870b93510ec6c>, Acesso em 04/15.

OLIVEIRA, C. M. Wood Bio Briquete Brasil. Edição eletrônica, 2014

PAULA, L. E. R. Efeito da torrefação e briquetagem nas propriedades energéticas de resíduos agroindustriais. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Lavras - Lavras, 2014.

PENG, J. H; BI, X. T; SOKHANSANJ, S.; LIM, C. J. Torrefaction and densification of different species of softwood residues. Fuel, v.111, p.411–21, 2013.

PERRIER, X.; DE LANGHE, E.; DONOHUE, M.; LENTFER, C.; VRYDAGHS, L.; BAKRY, F.; CARREEL, F.; HIPPOLYTE, I.; HORRY, J.P.; JENNY, C.; LEBOT, V.; RISTERUCCI, A. M.; TOMEKPE, K.; DOUTRELEPONT H.; BALL, T.; MANWARING, J.; DE MARET, P.; DENHAM, T. Multidisciplinary perspectives on banana (*Musa spp.*) domestication. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, Washington, v.108, n.28, p.1311-1318, 2011.

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. 273-283, 2011.

PROTÁSIO, T. P. Biomassa residual do coco babaçu: potencial de uso bioenergético nas regiões norte e nordeste do Brasil. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Lavras - Lavras, 2014.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; MENDES, R. F.; RIBEIRO, M. X.; TRUGILHO, P.F.; LEITE, E. R. S. Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, n.11, p.1252–1258, 2012.

QUIRINO, W. F.; PINHA, I. V. O.; MOREIRA, A. C. O.; SOUZA, F. E.; FILHO, M. T. Densitometria de raios x na análise da qualidade de briquetes de resíduos de madeira. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 40, n. 96, p. 525-536, 2012.

ROCHA E.P.A; SOUZA D.F.; DAMASCENO S. M. Estudo da viabilidade da utilização de briquete de capim como fonte alternativa de energia para queima em alto-forno. VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. Uberlândia, 2009.

RODRIGUES, T. O. Efeitos da torrefação no condicionamento de biomassa para fins energéticos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Floresta). Universidade de Brasília – Brasília, 2009.

RODRIGUES, T. O., ROUSSET, P. L. A. Effects of torrefaction on energy properties of *Eucalyptus grandis* wood. *CERNE*, v.15, n.4, p. 446-452, 2015.

SADAKA, S., NEGI, S. Improvements of Biomass Physical and Thermochemical Characteristics via Torrefaction Process. *Environmental Progress e Sustainable Energy*, v.28, n.3, p. 427-434, 2009.

SAEED, M. A.; AHMAD, S. W.; KAZMI, M.; MOHSIN, M.; FERROZE, N. Impact of torrefaction technique on the moisture contents, bulk density and

calorific value of briquetted biomass. Polish Journal of Chemical Technology, v.17, n2, p, 23-28, 2015.

SANTOS, G. R., SILVA, A. G. Torrefação da biomassa proveniente de resíduos do cacau (*Theobroma Cacao* L.) para produção de biocombustível sólido no estado da Bahia. I congresso nacional de engenharia de petróleo, gás natural e biocombustíveis II workshop de engenharia de petróleo - Campina Grande – PB - de 13 a 15 de maio de 2015.

SANTOS, J. R. S. Estudo da biomassa torrada de resíduos florestais de eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos. Dissertação (Mestrado em Ciências – Tecnologia de Produtos Florestais). Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz” – Piracicaba, 2012.

SOARES, J. D. R.; PASQUAL, M.; LACERDA, W. S.; SILVA, S. O.; DONATO, S. L. R. Comparison of techniques used in the prediction of yield in banana plants. Scientia Horticulturae, v.167, p.84-90, 2014.

SOUZA, F. Avaliação da qualidade de briquetes produzidos com seis biomassas agroflorestais por métodos não destrutivos. Tese (Doutorado). Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia – Departamento de Engenharia Florestal - Brasília, 2014

SOUZA, O.; FEDERIZZI, M.; COELHO, B.; WAGNER, T. M.; WISBECK, E. Biodegradação de resíduos lignocelulósicos gerados na bananicultura e sua valorização para a produção de biogás. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.14, n.14, p. 438-443, 2010.

SCHULZ, M., A. Produção de bioetanol a partir de rejeitos da bananicultura: polpa e cascas de banana. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos). Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE – Joinville, 2010.

STELTE, W.; HOLMB, J. K.; SANADIC, A. R; BARSBERGC, S.; AHRENFELDTA, J.; HENRIKSEN, U. B. Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. Fuel, v. 90, p. 3285-3290, 2011.

TAVARES, S. R. L.; SANTOS, T. E. Uso de diferentes fontes de biomassa vegetal para produção de biocombustíveis sólidos. Holos, v. 5, n. 29, p. 19-27, 2013.

TECNOBRIQ. Disponível em: < <http://www.tecnobriq.com/downloads>>  
Acesso em 02/2016.

THEERARATTANANOON, K.; XU, F.; WILSON, J.; BALLARD, R.; MCKINNEY, L.; STAGGENBORG, S.; VADLANIB, P.; PEID, Z.J. e WANGPHYSICAL, D. Physical properties of pellets made from sorghum stalk, corn stover, wheat straw, and big bluestem. *Industrial Crops and Products*, v. 33, n. 2, p. 325-332, 2011.

TUMULURU, J. S.; WRIGHT, T. C.; HESS, J. R.; KENNEY, K. L. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 5, p. 683-707, 2011.

TUMULURU, J.S.; TABIL, L.G.; SONG, Y.; IROBA, K.L.;MEDA, V. Grinding energy and physical properties of chopped and hammer-milled barley, wheat, oat and canola straws. *Biomass Bioenergy*, v. 60, p. 58–67, 2014.

TRANA, K-Q.; LUOB, X.; SEISENBAEVAC, G.; JIRJISB, R. Stump torrefaction for bioenergy application. *Applied Energy*, v.112, p.539-546, 2013.

YAN Q., MODIGELL M. Mechanical Pretreatment of Lignocellulosic Biomass Using a Screw Press as an Essential Step in the Biofuel Production. *Chemical Engineering Transactions*, v.29, p. 601-606, 2012.

YEHIA, K. A. Estimation of roll press design parameters based on the assessment of a particular nip region, *Powder Technology*, p. 148–153, 2007.

WONGSIRIAMNUAY, T., TIPPAYAWONG, N. Effect of densification parameters on the properties of maize residue pellets. *Biosystems Engineering*, v.139, p. 111-120, 2015.

## ANEXO I

Resultados da análise de variância, ANOVA, variando a granulometria da biomassa.

<b>Módulo de compactação - 30 °C</b>		<b>Módulo de compactação - 120 °C</b>	
<i>Fonte da variação</i>	<i>P-valor</i>	<i>Fonte da variação</i>	<i>P-valor</i>
Tipo de Biomassa	0,558559	Tipo de Biomassa	0,014545
Pressão	0,140835	Pressão	0,190585

<b>Índice de porosidade - 30 °C</b>		<b>Índice de porosidade -120 °C</b>	
<i>Fonte da variação</i>	<i>P-valor</i>	<i>Fonte da variação</i>	<i>P-valor</i>
Tipo de Biomassa	0,006069	Tipo de Biomassa	0,033134
Pressão	0,079954	Pressão	0,399189

<b>Densidade crítica - 30 °C</b>		<b>Densidade crítica -120 °C</b>	
<i>Fonte da variação</i>	<i>P-valor</i>	<i>Fonte da variação</i>	<i>P-valor</i>
Tipo de Biomassa	0,024873	Tipo de Biomassa	0,042493
Pressão	0,030491	Pressão	0,184965

<b>Densidade final - 30 °C</b>		<b>Densidade final - 120 °C</b>	
<i>Fonte da variação</i>	<i>P-valor</i>	<i>Fonte da variação</i>	<i>P-valor</i>
Tipo de Biomassa	0,008105	Tipo de Biomassa	0,123459
Pressão	0,067198	Pressão	0,728480

<b>Energia de compactação - 30 °C</b>		<b>Energia de compactação - 120 °C</b>	
<i>Fonte da variação</i>	<i>P-valor</i>	<i>Fonte da variação</i>	<i>P-valor</i>
Tipo de Biomassa	0,003007	Tipo de Biomassa	0,530218
Pressão	0,001447	Pressão	0,006704

<b>Taxa de compressão final - 30 °C</b>		<b>Taxa de compressão final - 120 °C</b>	
<i>Fonte da variação</i>	<i>P-valor</i>	<i>Fonte da variação</i>	<i>P-valor</i>
Tipo de Biomassa	0,003832	Tipo de Biomassa	0,017734
Pressão	0,052929	Pressão	0,684464

## ANEXO II

Resultados da análise de variância, ANOVA, com a biomassa torrificada.

<b>Módulo de compactação - 30 °C</b>		<b>Módulo de compactação - 120 °C</b>	
<i>Fonte da variação</i>	<i>P-valor</i>	<i>Fonte da variação</i>	<i>P-valor</i>
Tipo de Biomassa	0,001550	Tipo de Biomassa	8,80E-06
Pressão	0,329984	Pressão	0,269296

<b>Índice de porosidade - 30 °C</b>		<b>Índice de porosidade -120 °C</b>	
<i>Fonte da variação</i>	<i>P-valor</i>	<i>Fonte da variação</i>	<i>P-valor</i>
Tipo de Biomassa	0,03762	Tipo de Biomassa	0,00254
Pressão	0,79032	Pressão	0,33406

<b>Densidade crítica - 30 °C</b>		<b>Densidade crítica -120 °C</b>	
<i>Fonte da variação</i>	<i>P-valor</i>	<i>Fonte da variação</i>	<i>P-valor</i>
Tipo de Biomassa	0,08122	Tipo de Biomassa	5,84E-05
Pressão	0,79266	Pressão	0,170150

<b>Densidade final - 30 °C</b>		<b>Densidade final - 120 °C</b>	
<i>Fonte da variação</i>	<i>P-valor</i>	<i>Fonte da variação</i>	<i>P-valor</i>
Tipo de Biomassa	0,01357	Tipo de Biomassa	0,26000
Pressão	0,00317	Pressão	0,05067

<b>Energia de compactação - 30 °C</b>		<b>Energia de compactação - 120 °C</b>	
<i>Fonte da variação</i>	<i>P-valor</i>	<i>Fonte da variação</i>	<i>P-valor</i>
Tipo de Biomassa	0,0181193	Tipo de Biomassa	0,00292
Pressão	0,0019783	Pressão	0,00208

<b>Taxa de compressão final - 30 °C</b>		<b>Taxa de compressão final - 120 °C</b>	
<i>Fonte da variação</i>	<i>P-valor</i>	<i>Fonte da variação</i>	<i>P-valor</i>
Tipo de Biomassa	0,00024	Tipo de Biomassa	0,04227
Pressão	0,00328	Pressão	0,05053