

MARIANA ALMEIDA VILAS BOAS

**EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO DA MADEIRA PARA PRODUÇÃO DE
BRIQUETES**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2011

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

V697e
2011

Vilas Boas, Mariana Almeida, 1983-
Efeito do tratamento térmico da madeira para produção de
briquetes / Mariana Almeida Vilas Boas. – Viçosa, MG, 2011.
xii, 65f. ; 29cm.

Orientador: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 59-65.

1. Briquetes (Combustíveis). 2. Madeira - Tratamento
térmico. 3. Madeira - Produtos. 4. Combustão. I. Universidade
Federal de Viçosa. II. Título.

CDO adapt. CDD 634.9839813

MARIANA ALMEIDA VILAS BOAS

**EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO DA MADEIRA PARA PRODUÇÃO DE
BRIQUETES**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 03 de agosto de 2011.

Prof. Benedito Rocha Vital
(Co-orientador)

Prof.^a Ana Márcia M. Ladeira Carvalho

Dr.^a Solange de Oliveira Araújo

Dr.^a Rosimeire Cavalcante dos Santos

Prof.^a Angélica de Cássia O. Carneiro
(Orientadora)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me iluminar nos momentos difíceis e me dar forças para superar todas as dificuldades, sempre mostrando o caminho certo nas horas mais necessitadas e incertas.

Aos meus amores, meus pais, Carlos Alberto e Maria, minha eterna gratidão. Obrigada por tudo, pelo amor, dedicação, carinho, paciência e confiança.

Ao meu querido irmão Lincon, pela força, torcida e por seus preciosos conselhos. A minha cunhada Sueli, pelo apoio e por suas palavras sábias.

A minha orientadora, Professora “Cassinha”, pela oportunidade, orientações e amizade.

Ao Prof. Benedito, que sempre esteve disposto a ajudar, principalmente nas análises estatísticas.

A grande amiga Solange, pela amizade, momentos divertidos, ensinamentos, conselhos nas horas mais difíceis. MUITÍSSIMO obrigada!

Agradeço aos amigos Bráulio, Marcelino e Diego que me ajudaram literamente com “muita força” na execução do experimento. A amiga Cíntia também pela colaboração.

A todos os funcionários do Lapem e LPM, pela contribuição neste trabalho, em especial ao seu “Maninho”, Aristeu, “Moiado”, Joel e Osvaldo.

Aos amigos do Lapem, meu muito obrigada a todos vocês pela colaboração sempre que necessário e por todos instantes engraçados na hora do cafezinho.

As minhas eternas amigas de república Carol e Laélia, por todos os anos de convivência, companheirismo, momentos de desconcentração e decisões.

Aos amigos da pós-graduação, mas em especial minha amiga Lívia, pela força e incentivo.

Ao Renatinho, pelo auxílio nas análises estatísticas.

A Ritinha e Alexandre da pós-graduação, por sempre estarem dispostos a ajudar.

Ao Fábio (sete), obrigada pela amizade e contribuição por todos esses anos.

Ao amigo Tales, que sempre esteve disposto a escutar os meus desabaços e por compartilhar dos momentos descontraídos de Viçosa.

Ao CNPq, pelo suporte financeiro, que permitiu a realização deste trabalho.

Enfim a todos aqueles que de uma forma ou de outra fizeram parte de mais esta conquista.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vi
RESUMO	ix
ABSTRACT	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo geral	3
2.2 Objetivos específicos	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 Biomassa.....	4
3.2 Tratamento térmico	5
3.3 Aspectos gerais da briquetagem	7
3.4 Vantagens e desvantagens do uso de briquetes.....	8
3.5 Uso dos briquetes	9
3.6 Mecanismos de compactação.....	9
3.6.1 Prensa de pistão mecânico	10
3.6.2 Prensa com parafuso cônico	10
3.6.3 Prensa com parafuso cilíndrico e matriz aquecida	11
3.6.4 Prensa peletizadora.....	11
3.7 Fatores que afetam a compactação.....	11
3.7.1 Tamanho das partículas	11
3.7.2 Densidade	12
3.7.3 Pressão e Temperatura	12
3.7.4 Teor de umidade	13
3.8 Espécies estudadas	14
3.8.1 Bracatinga (<i>Mimosa scabrella</i> Bentham)	14
3.8.2 Cumaru (<i>Dipteryx odorata</i>)	15
3.8.3 Peroba mica (<i>Aspidosperma populifolium</i>)	16
3.8.4 <i>Eucalyptus</i> sp	16
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	18
4.1 Local e matéria-prima.....	18
4.2 Propriedades das partículas tratadas termicamente	19
4.2.1 Umidade de equilíbrio higroscópico das partículas	19
4.2.2 Poder calorífico superior.....	20

4.2.3	Análise química imediata	20
4.3	Produção de briquetes	21
4.4	Determinação das propriedades físicas e mecânica dos briquetes.....	21
4.4.1	Análises da perda de massa no processo de briquetagem, taxa de retorno e absorção de água dos briquetes	21
4.4.2	Umidade de equilíbrio higroscópico dos briquetes	22
4.4.3	Densidade aparente e densidade energética dos briquetes	22
4.4.4	Carga de ruptura dos briquetes	22
4.5	Delineamento experimental.....	23
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	24
5.1	Propriedades das partículas tratadas termicamente	24
5.1.1	Matérias Voláteis	24
5.1.2	Teor de Cinzas	26
5.1.3	Carbono fixo	27
5.1.4	Poder calorífico superior.....	29
5.2	Propriedades dos briquetes.....	32
5.2.1	Aspectos visuais.....	32
5.2.2	Taxa de retorno no comprimento e diâmetro dos briquetes	32
5.2.3	Perda de massa	37
5.2.4	Absorção de água	40
5.2.5	Umidade de equilíbrio higroscópico.....	44
5.2.6	Densidade aparente	47
5.2.7	Densidade energética.....	51
5.2.8	Carga de ruptura	54
6.	CONCLUSÕES.....	58
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores médios da densidade básica das espécies	18
Tabela 2 – Valores médios das dimensões das partículas.....	19
Tabela 3 – Valores médios de umidade de equilíbrio higroscópico das partículas tratadas termicamente.	20
Tabela 4 – Valores médios das matérias voláteis (%) das partículas em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies.	24
Tabela 5 – Valores médios do teor de cinzas (%) das partículas em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies.	26
Tabela 6 – Valores médios do teor de carbono fixo (%) das partículas em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies.....	28
Tabela 7 – Valores médios do poder calorífico superior (kcal kg^{-1}) das partículas em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies.	30
Tabela 8 - Valores médios da taxa de retorno no comprimento (%) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e da pressão de compactação.	32
Tabela 9 – Valores médios da taxa de retorno no comprimento (%) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies.	33
Tabela 10 – Valores médios da taxa de retorno no comprimento (%) dos briquetes em função da pressão de compactação e das espécies.	34
Tabela 11 – Valores médios da taxa de retorno no diâmetro (%) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e da pressão de compactação.	35

Tabela 12 – Valores médios da taxa de retorno no diâmetro (%) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies.....	36
Tabela 13 – Valores médios da taxa de retorno no diâmetro (%) dos briquetes em função da pressão de compactação e das espécies.....	37
Tabela 14 – Valores médios da perda de massa (%) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e da pressão de compactação..	38
Tabela 15 – Valores médios da perda de massa (%) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies..	39
Tabela 16 – Valores médios da perda de massa (%) dos briquetes em função da pressão de compactação e das espécies.....	40
Tabela 17 – Valores médios da absorção de água (%) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e da pressão de compactação..	41
Tabela 18 – Valores médios de absorção de água (%) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies..	42
Tabela 19 – Valores médios de absorção de água (%) dos briquetes em função da pressão de compactação e das espécies.....	43
Tabela 20 – Valores médios de umidade de equilíbrio higroscópico (%) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e da pressão de compactação.....	44
Tabela 21 – Valores médios de umidade de equilíbrio higroscópico (%) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies...	45
Tabela 22 – Valores médios de umidade de equilíbrio higroscópico (%) dos briquetes em função da pressão de compactação e das espécies...	46
Tabela 23 – Valores médios da densidade aparente (g cm^{-3}) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e da pressão de compactação..	48
Tabela 24 – Valores médios da densidade aparente (g cm^{-3}) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies.....	49
Tabela 25 – Valores médios da densidade aparente (g cm^{-3}) dos briquetes em função da pressão de compactação e das espécies.....	50
Tabela 26 – Valores médios de densidade energética (Gcal m^{-3}) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e da pressão de compactação.....	52
Tabela 27 – Valores médios de densidade energética (Gcal m^{-3}) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies.....	53
Tabela 28 – Valores médios de densidade energética (Gcal m^{-3}) dos briquetes em função da pressão de compactação e das espécies.....	54

Tabela 29 – Valores médios da carga de ruptura (kgf) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e da pressão de compactação..	55
Tabela 30 – Valores médios da carga de ruptura (kgf) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies..	56
Tabela 31 – Valores médios da carga de ruptura (kgf) dos briquetes em função da pressão de compactação e das espécies.....	57

RESUMO

VILAS BOAS, Mariana Almeida. M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2011. **Efeito do tratamento térmico da madeira para produção de briquetes.** Orientadora: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro. Coorientador: Benedito Rocha Vital.

A demanda mundial por energia vem associada ao aumento do consumo de combustíveis fósseis, de modo que a maioria dos países se conscientizou da necessidade de utilização de fontes alternativas de energia renovável. Nesse contexto, destaca-se a biomassa florestal com características tais como alto teor de umidade, baixo poder calorífico, baixo teor de carbono fixo e alto teor de matérias voláteis. Entre as alternativas para melhorar as propriedades energéticas desse combustível heterogêneo, destacam-se os processos de tratamento térmico e briquetagem. Deste modo, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito do tratamento térmico da madeira de diferentes espécies para produção de briquetes. Foram utilizadas as madeiras de *Mimosa scabrella* (Bracatinga), *Dipteryx odorata* (Cumaru), *Eucalyptus grandis*, *Aspidosperma populifolium* (Peroba mica) e *Eucalyptus sp.* tratadas termicamente nas temperaturas de 180, 200 e 220 °C, por um período de sessenta minutos, para cada temperatura, em uma estufa com atmosfera de nitrogênio. Os briquetes foram produzidos em briquetadeira laboratorial utilizando uma temperatura de 120 °C, tempo de prensagem de 7 minutos e tempo de resfriamento de 6 minutos e pressões iguais a 70,3; 105,4 e 140,6 kgf/cm². Para avaliar as propriedades das partículas tratadas termicamente, foram determinados a análise química imediata e o poder calorífico superior. A qualidade dos briquetes foi avaliada

pela determinação das propriedades físicas e mecânica. Os resultados mostraram potencial das diferentes espécies para a produção de briquetes. A melhor temperatura de tratamento térmico foi de 220 °C, principalmente com relação à densidade energética dos briquetes. As pressões de compactação de 105,4 e 140,6 kgf/cm² foram as mais adequadas para a produção de briquetes, por aumentarem, de modo geral, a densidade e a carga de ruptura. O poder calorífico das diferentes espécies, no geral, aumentou com a elevação da temperatura de tratamento térmico.

ABSTRACT

VILAS BOAS, Mariana Almeida. M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2011. **Effect of thermal treatment of wood in the production of briquettes**, Adviser: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro. Co-adviser: Benedito Rocha Vital.

Global demand for energy is associated with increased consumption of fossil fuels, so that most countries are conscious of the need to use alternative sources of renewable energy. In this context, there is the forest biomass with features such as high moisture content, low calorific value, low fixed carbon content and high volatile material content. Among the alternatives to improve the energy properties of the heterogeneous fuel, highlights the processes of thermal treatment and briquetting. Thus this study aimed to evaluate the effect of thermal treatment of wood of different species in the production of briquettes. We used the wood of *Mimosa scabrella* (Bracatinga) *Dipteryx odorata* (Cumaru), *Eucalyptus grandis*, *Aspidosperma populifolium* (Peroba mica) and *Eucalyptus sp.*, thermal treated at temperatures of 180, 200 and 220 °C for sixty minutes each temperature in stove with a nitrogen atmosphere. The briquettes were produced in laboratory briquetter using a temperature 120 °C, pressing time of 7 minutes and cooling time of 6 minutes, and pressures equal to 70,3; 105,4 e 140,6 kgf/cm². To evaluate the properties of heat treated particles, were determined the immediate chemical analysis and high calorific value. The quality of the briquettes was evaluated by determining the physical and mechanical properties. The results showed the potential of different species for the production briquettes. The best thermal treatment temperature was 220 °C,

principally related to energy density of the briquettes. The compression pressure of 105,4 e 140,6 kgf/cm² were more suitable for the production of briquettes, by increasing, in general, the density and rupture load. The high calorific value of different species, generally increased with increasing thermal treatment temperature.

1. INTRODUÇÃO

O consumo energético vem aumentando em ritmo acelerado à medida que a população do mundo cresce e, como consequência, os países aumentaram drasticamente o consumo de combustíveis fósseis, principalmente os derivados de petróleo. No entanto, o emprego dos combustíveis não renováveis provoca alterações ambientais, como a emissão de gases causadores do efeito estufa, entre outros.

Diante desta realidade, observa-se a necessidade de utilização de fontes alternativas de energia, preferencialmente as renováveis, entre as quais se destaca a biomassa florestal que possui características desejáveis que permitem sua utilização como fonte energética. A biomassa pode ser convertida em energia através de diferentes processos, tais como combustão, pirólise, gaseificação e liquefação. Além disso, vale ressaltar que o uso da biomassa residual vem se destacando a cada ano como forma de aproveitamento de resíduos para geração de energia, aportando ganhos ambientais, sociais e econômicos.

Entretanto, a biomassa tem algumas características que dificultam seu uso direto como combustível, tais como alto teor de umidade, baixo poder calorífico e baixo teor de carbono fixo associado ao alto teor de matérias voláteis, além da baixa densidade, principalmente quando da utilização da biomassa residual. Diante disso, é necessário buscar o uso mais eficiente desse combustível heterogêneo a fim de padronizar e aumentar a qualidade da biomassa. Para tanto, existem diversos processos, entre os quais se destacam o tratamento térmico e a briquetagem.

O tratamento térmico da biomassa produz um combustível com melhores características para uso energético, sendo um processo de conversão termoquímico. O nível da temperatura utilizada dependerá do grau de modificação da madeira que se pretende obter no produto final.

A briquetagem consiste em comprimir uma massa de partículas a pressões elevadas, o que ocasiona atrito e aumento de temperatura, conseqüentemente, provocando a plasticização da lignina que atua como elemento aglomerante entre as partículas, dando origem aos briquetes. Alguns fatores podem afetar o processo de compactação, como, por exemplo, o tamanho das partículas, a pressão e temperatura de briquetagem e a umidade das partículas.

A qualidade dos briquetes é influenciada pelas características físicas e químicas da matéria-prima e também pelos parâmetros de produção, principalmente as condições de briquetagem. A produção de briquetes apresenta diversas vantagens, destacando-se a redução do volume dos resíduos associado ao menor custo de transporte e armazenamento e o aumento do conteúdo calorífico do material por unidade de volume.

Portanto, sendo o Brasil um grande produtor de biomassa residual, a briquetagem, aliada ao tratamento térmico, torna-se uma alternativa promissora para melhorar a qualidade dos briquetes, uma vez que aumenta a densidade energética perante outras fontes energéticas além de o processo gerar emprego, renda e favorecer o meio ambiente.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho teve como objetivo geral avaliar o efeito do tratamento térmico da madeira de diferentes espécies para produção de briquetes.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o efeito da temperatura de tratamento térmico nas propriedades da madeira para produção de briquetes;
- Avaliar a influência da pressão de compactação na produção de briquetes; e
- Avaliar o efeito da espécie, da temperatura de tratamento térmico e pressão de compactação nas propriedades físicas e mecânica dos briquetes.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Biomassa

A maioria dos países, sejam eles desenvolvidos ou não, está promovendo ações para que as energias alternativas renováveis tenham participações significativas em suas matrizes energéticas. Uma das causas para essa mudança é a necessidade da redução do uso de derivados do petróleo e, conseqüentemente, da dependência energética desses países em relação aos países exportadores de petróleo (CORTEZ et al., 1997). Diante disso, os países vêm se conscientizando da necessidade de buscar fontes alternativas de energia, preferencialmente renováveis, como a biomassa.

O aproveitamento da energia da biomassa consiste no uso de lenha, resíduos orgânicos industriais ou domésticos, agrícolas, florestais ou outras fontes de matérias orgânicas para a geração de calor, eletricidade e outros fins (VIEIRA, 2005).

Os resíduos “in natura” apresentam algumas características que podem restringir seu uso direto como combustível, tais como baixa densidade, alta umidade e baixo poder calorífico. Portanto, a fim de melhorar a eficiência energética da biomassa, é necessário, na maioria dos casos, a utilização de processos industriais para tentar corrigir algumas propriedades (GONÇALVES, 2010).

A indústria de base florestal como um todo se caracteriza pela grande geração de resíduos ao longo do processo de produção e pelo beneficiamento da madeira (FURTADO et al. 2010). De acordo com Gentil (2008), estima-se que no Brasil, em 2005, tenham sido produzidos 14 milhões de toneladas de

descartes madeireiros com um potencial de geração de 4132×10^6 tep de energia.

Segundo Gonçalves (2006), o problema de verificar a disponibilidade e o potencial dos resíduos lignocelulósicos é que dificilmente são feitas pesquisas pra quantificá-los, como é feito com outros insumos energéticos, em que se quantificam recursos e reservas de petróleo, carvão mineral, gás natural ou produção anual de cana-de-açúcar e culturas alimentícias.

A produção de biomassa para fins energéticos renováveis gera empregos e requer menor investimento quando comparada aos combustíveis fósseis. Além disso, tem o ciclo de carbono fechado, ou seja, diminui a emissão de poluentes, reduzindo a utilização das fontes não-renováveis. Essas são apenas algumas vantagens, porém, seu uso deve ser de forma sustentável, de acordo com técnicas apropriadas de manejo e cultivo (GONÇALVES, 2010).

3.2 Tratamento térmico

São várias as técnicas aplicadas nos tratamentos térmicos, no entanto, a base principal é a mesma, ou seja, a madeira é aquecida a alta temperatura em uma atmosfera pobre em oxigênio. O nível da temperatura utilizada dependerá do grau de modificação da madeira que se pretende obter no produto final (PINCELLI, 2002; MENDES, 2010).

A madeira tratada termicamente pode apresentar alterações nas suas propriedades de acordo com o aumento da temperatura. Entre elas, as principais são aumento da estabilidade dimensional, aumento da resistência ao ataques de organismos xilófagos, redução da higroscopicidade e diminuição das propriedades mecânicas. No uso energético, a redução da higroscopicidade garante melhores desempenhos na geração de energia térmica, pois não há gasto energético para evaporação da água, além da inexpressiva absorção de umidade do ambiente, o que permite o armazenamento do combustível por períodos mais longos. A diminuição das propriedades mecânicas reflete-se no aumento da friabilidade, que é a propriedade de a madeira gerar finos (RODRIGUES, 2009).

Na madeira aquecida ocorrem mudanças na natureza de seus constituintes químicos (celulose, hemiceluloses e lignina), que se decompõem em diferentes formas, sobretudo as hemiceluloses, que são os constiuintes

mais sensíveis à ação do calor (BRITO, 1993). Segundo Figueroa e Morais (2009), os polímeros da madeira apresentam estabilidade térmica diferenciada em função da região cristalina de cada espécie.

Vale ressaltar, no entanto, que nem sempre o calor é, isoladamente, o único responsável pelas transformações sofridas pela madeira. Podem existir fatores adicionais influenciando o processo, tais como o tempo de tratamento, a velocidade de aquecimento, a atmosfera, a pressão etc. (PINCELLI, 2002).

A celulose e a lignina se degradam mais lentamente em temperaturas mais elevadas do que as hemiceluloses. Já os extrativos da madeira se degradam mais facilmente, podendo esses compostos se volatilizar durante o aquecimento (OLIVEIRA, 2009).

O primeiro constituinte da madeira a sofrer alterações sob a ação do calor são as hemiceluloses, fenômeno que ocorre entre 160 °C e 260 °C. Essas alterações são devidas à sua estrutura heterogênea, à natureza não cristalina de sua estrutura e a seu baixo peso molecular em relação aos outros polímeros da madeira. A decomposição térmica da celulose ocorre entre 200 e 280 °C, e a lignina, por ser termicamente mais resistente que os demais constituintes, se degrada entre 225 e 450 °C (FIGUEROA e MORAIS, 2009).

A torrefação tem como finalidade a obtenção de um produto sólido a partir da pirólise da madeira para fins energéticos. É um processo de pré-carbonização, o qual ocorre na fase endotérmica da pirólise, entre 200 e 300 °C. Nestas condições, são degradadas as hemiceluloses, sendo removidos a umidade, o ácido acético, frações de fenol e outros compostos de baixo poder calorífico. Deste processo, resulta um material intermediário entre a biomassa e o carvão, com altos rendimentos energéticos. O objetivo da torrefação é concentrar a energia da biomassa em um produto formado em curto tempo, baixas taxas de aquecimento e temperaturas moderadas, permitindo reter os voláteis de maior poder calorífico no próprio produto (DOAT, 1985; BARRETO et al., 2008). Felfli (2003), também, afirma que a biomassa tratada termicamente apresenta maior poder calorífico, podendo ser utilizada para produção de briquete.

A faixa de temperatura em que ocorre a torrefação promove a emissão de compostos voláteis mais sensíveis ao aquecimento. Esta emissão gera uma perda de até 30 % de massa e de 10 % de conteúdo energético. As propriedades da madeira torrificada variam principalmente em função do tempo

e da temperatura final do processo, velocidade de aquecimento e das propriedades iniciais da madeira. (BERGMAN et al., 2005; RODRIGUES, 2009). Felfli et al. (2003) relataram que a temperatura de torrefação tem maior influência no processo que o tempo de residência da biomassa no reator.

Estudos realizados por Felfli (1999) demonstraram que a temperatura tem uma influência predominante no processo de tratamento térmico, pois quando foi aumentada de 220 para 270 °C (22,7 %), o poder calorífico aumentou em média 10 %. Entretanto, o incremento no tempo de residência em 200 % (0,5 até 1,5 horas) proporcionou um aumento em média de apenas 4 % do poder calorífico.

Já o autor Rodrigues (2009), trabalhando com eucalipto, obteve aumentos percentuais de poder calorífico de 3,93; 9,56 e 15,74 % para as madeiras tratadas termicamente nas temperaturas de 220, 250 e 280 °C, respectivamente.

3.3 Aspectos gerais da briquetagem

O processo de briquetagem consiste na aplicação de pressão em uma massa de partículas dispersas com objetivo de torná-las um sólido geométrico compacto com uma maior concentração de energia, considerando-se a massa específica aparente e o poder calorífico médio dos briquetes e resíduos. Estima-se que 1,0 m³ de briquetes contenha pelo menos 5 vezes mais energia que 1,0 m³ de resíduos (QUIRINO, 1991). Esta operação pode ser realizada com ou sem a presença de um agente aglutinante (FILIPPETTO, 2008).

Os aglutinantes são utilizados quando o material a ser aglomerado não apresenta resistência à compressão e ao impacto após a compactação. O resíduo de madeira contém lignina em sua composição, dispensando a utilização de aglutinantes naturais ou químicos (CARVALHO e BRINCK, 2004).

Além dos resíduos de madeira, outros resíduos também são utilizados nos processos de compactação para fins energéticos, como o bagaço e a palha de cana-de-açúcar, casca de arroz, algodão, café e resíduos agroindustriais (QUIRINO, 1991; VIEIRA, 2005).

A produção de briquetes pode ser afetada por diversos fatores, tais como a temperatura, pressão, tamanho das partículas e umidade do material (QUIRINO, 1991).

Segundo Stauber (1895), citado por Filippetto (2008), na segunda metade do século XIX foi desenvolvida a primeira máquina a pistão para produzir briquetes de turfa. Em 1923, a sociedade “Pacific Coal and Wood” de Los Angeles estava já comercializando briquetes de resíduos de madeira, usando uma prensa especial. Os briquetes eram cilíndricos, com diâmetro aproximado de 7,5 cm e comprimento de 25 cm, amarrados com arame para manter a coesão durante o transporte.

No Brasil, o processo de briquetagem na maioria das empresas utiliza resíduos de madeira como matéria-prima. Em estudo realizado por Felfli et al. (2011), foram encontradas apenas duas empresas que utilizam matérias-primas diferentes: uma fábrica no Estado de Mato Grosso, que utiliza casca de arroz, e outra no Estado de São Paulo, que utiliza resíduos de madeira provenientes da produção de lápis.

No Estado de São Paulo, por exemplo, anualmente são gerados 129.000 toneladas de resíduos lignocelulósicos, e apenas 12% destes resíduos são briquetados. Existem diversos fatores que contribuem para esse cenário, entre eles está, principalmente, a dispersão geográfica. Os preços de venda dos briquetes variam dependendo do tipo de cliente, do tamanho da compra e da distância da entrega do produto, estando na faixa de R\$ 200 a 305 por tonelada, com uma média de preço de R\$ 250 (FELFLI et al., 2011).

De acordo com a pesquisa realizada por Felfli et al. (2011), os resíduos de madeira (serragem, lascas de madeira e aparas), casca de arroz, casca de café são os resíduos de maior viabilidade para briquetagem a curto prazo no Brasil.

O custo médio da tonelada de serragem no Estado de Minas Gerais em 2011, segundo informações de empresas, está em torno de 75 reais, com valores variando de 50 a 100 reais dependendo das características da serragem, tais como teor de umidade, poder calorífico e teor de cinzas.

3.4 Vantagens e desvantagens do uso de briquetes

A compactação da biomassa apresenta várias vantagens, entre elas, o aumento do conteúdo calorífico do material por unidade de volume, maior facilidade para manipulação, transporte e armazenamento dos briquetes, a homogeneidade de forma e a granulometria melhoram a eficiência de queima,

sendo uniforme e de qualidade. Além disso, a briquetagem ajuda a resolver problemas de disposição de resíduos (BHATTACHARYA, 2004). Segundo Quirino (1991), a baixa umidade e a elevada densidade reduzem a biodegradação dos resíduos briquetados.

Comparado à lenha, o briquete apresenta muitas vantagens, pois sua densidade energética e seu baixo teor de umidade (8 a 12 %) o farão sempre superior à lenha (25 a 35 % de teor de umidade). Por causa da maior densidade e do maior poder calorífico, a estocagem terá mais energia por unidade de volume, reduzindo os pátios de estocagem e a dimensão dos equipamentos de queima (SILVA, 2007).

O uso dos briquetes apresenta algumas desvantagens como os altos investimentos em equipamentos e gastos de energia no processo, tendência de se desmancharem quando expostos à água ou submetidos à alta umidade, alta carga tributária incidente na venda do produto e nos equipamentos utilizados (BHATTACHARYA, 2004).

3.5 Uso dos briquetes

Os principais usos dos briquetes são basicamente para as pizzarias, padarias, restaurantes, lareiras, aquecimento de água em hotéis e em lavanderias, aquecimento de piscinas etc.(FILIPPETTO, 2008).

Um outro uso dos briquetes é nas indústrias cerâmicas, nas quais eles são usados para substituir a lenha, que com o passar do tempo está se tornando escassa e de difícil acesso. A lenha obtida a grandes distâncias é inviável, pois o frete é dispendioso, encarecendo o produto. Os briquetes também podem ser utilizados em centrais termelétricas, sendo queimados na caldeira para produzir vapor com alta pressão (SILVA, 2007).

Segundo Vinterback (2006), citado por Gentil (2008), nos países de clima frio da Europa com até 30 °C negativos como a Suécia, o pelete e o briquete são mais usados para aquecimento doméstico.

3.6 Mecanismos de compactação

No processo de briquetagem, são aplicadas pressões que ocasionam a elevação da temperatura da ordem de 100 a 150 °C pelo atrito entre as

partículas. O aumento da temperatura provoca a plasticização da lignina, substância que atua como elemento aglomerante das partículas de madeira. Para a aglomeração das partículas, é necessário que a umidade dos resíduos esteja entre 8 e 15 % e o tamanho das partículas entre 5 e 10 mm (LIPPEL, 2011).

Segundo Bhattacharya et al. (1989), os processos de compactação de biomassa estão divididos em duas categorias principais: a compactação quente em alta pressão e a compactação fria em baixa pressão. A compactação quente em alta pressão é a mais importante em relação à variedade de matérias que pode processar e às características dos produtos obtidos. O processo de compactação pode ser realizado empregando-se prensas de pistão, prensas de parafuso cônico ou cilíndrico com matriz aquecida e prensas peletizadoras.

3.6.1 Prensa de pistão mecânico

Na prensa de pistão mecânico, a matéria-prima é alimentada por um funil e compactada em uma matriz por meio de um pistão que se movimenta alternadamente. A matriz é geralmente constituída por um conduto afunilado de seção circular, que serve para compactar e extrudar na forma de briquetes (GONÇALVES, 2010). A matéria-prima é empurrada pelo pistão provocando alta pressão e uma fricção na parede da matriz, resultando em um aquecimento entre 150 e 200 °C durante o processo (SILVA, 2007). O resfriamento é necessário para permitir a condensação do vapor, do contrário, a pressão do vapor provocaria fissuras superficiais que fragilizariam os briquetes (FILIPPETTO, 2008).

Conforme Lequeux et al. (1988), citados por Silva (2007), as prensas de pistão possuem uma capacidade que pode variar de 40 kg/h a 2.500 kg/h. Os briquetes têm geralmente forma cilíndrica, com diâmetro entre 5 e 10 cm.

3.6.2 Prensa com parafuso cônico

Neste tipo de prensa, o parafuso cônico conduz a matéria-prima e a pré-compacta numa antecâmara, posteriormente, um cabeçote de compressão compacta e extrusa a biomassa em uma matriz. 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 (ERIKSSON e PRIOR, 1990).

3.6.3 Prensa com parafuso cilíndrico e matriz aquecida

Nesta briquetadeira, o material é forçado a passar direto por uma parte estreita, cônica e aquecida, com um molde de saída. O formato do molde dos briquetes pode ser circular ou quadrado, este último com os cantos arredondados. O orifício central serve para aumentar a densificação do material causada pela rotação da extrusora e eliminar a fumaça provocada pela pirólise parcial na superfície. Os briquetes apresentam de 5 a 10 cm de diâmetro. O material aquece acima de 200 °C durante o processo, sendo a maior parte do aquecimento causada pelo atrito entre as partículas. As máquinas possuem capacidade de briquetagem que pode variar de 50 a 800 kg/h (ERIKSSON e PRIOR, 1990).

3.6.4 Prensa peletizadora

A prensa peletizadora consiste em um rolo que gira contra uma matriz dotada de vários furos de pequeno diâmetro. A matéria-prima é colocada entre o rolo e a matriz, e a passagem do rolo provoca a extrusão do material através dos furos. O atrito do material entre as partes provoca o seu aquecimento. O produto extrudado é denominado de pellet devido ao pequeno diâmetro (BHATTACHARYA et al., 1989). A capacidade dessas máquinas pode variar de 1 t/h a 30 t/h. O tamanho dos pellets é normalmente de 5 mm a 15 mm de diâmetro, com um comprimento de 30 mm (SILVA, 2007).

3.7 Fatores que afetam a compactação

3.7.1 Tamanho das partículas

O tamanho das partículas é um fator importante, pois interfere na durabilidade dos briquetes. As partículas maiores afetam o processo de

compactação, pois são pontos de rachaduras e fissuras no produto final (KALIYAN e MOREY, 2009).

Os resíduos na forma de partículas pequenas, como a serragem, casca de café e arroz, podem ser usados diretamente no processo de briquetagem. Entretanto, a biomassa com tamanhos maiores deve ser reduzida a partículas menores para ser compactada adequadamente (SILVA, 2007).

De acordo com Koullas e Koukios (1987), citados por Silva (2007), quanto menor a partícula mais fácil o processo de compactação, pois há uma maior ligação entre elas devido a uma maior área de superfície de contato. O tamanho das partículas para uma aglomeração adequada pode variar de 5 a 10 mm (LIPPEL, 2011).

3.7.2 Densidade

O processo de briquetagem diminui expressivamente o volume da matéria-prima. Esta característica é muito importante para materiais de baixa densidade, que, no entanto, demandam maior energia no processo de compactação. Já os materiais com densidade mais alta não seriam de interesse para briquetagem devido ao pouco ganho na densificação destes materiais. Uma possibilidade para equilibrar as densidades de cada material seria a fabricação de briquetes através da mistura entre os resíduos com densidades diferentes. A proporção de mistura entre os resíduos deve levar em consideração, além das características energéticas e mecânicas do briquete, a menor geração de cinzas e a emissão de gases poluentes durante a combustão (RODRIGUES, 2010).

3.7.3 Pressão e Temperatura

A compactação dos resíduos ocorre com a aplicação de pressões que provocam a elevação da temperatura. De modo geral, na produção industrial de briquetes, as pressões aplicadas podem atingir até 200 MPa (LIPPEL, 2011).

A compactação em temperaturas acima de 100 °C ocasiona a plasticização da lignina contida nas células da biomassa, que age como um aglutinante entre as partículas, dispensando, assim, o uso de ligantes adicionais na biomassa. Além disso, temperaturas elevadas evaporam parte da

umidade da biomassa, melhorando o poder calorífico do produto compactado (BHATTACHARYA et al., 1989). Paula (2010), avaliando o efeito do tempo e da temperatura de briquetagem, verificou que a resistência à compressão dos briquetes se elevou com o aumento da temperatura.

A intensidade e o período de aplicação da pressão variam com as características do material e com o tipo de prensa (ANTUNES, 1982). A densidade final do produto depende da pressão aplicada durante a compactação (FILIPPETTO, 2008). Quanto menor a densidade do material de origem, maior a densidade aparente do produto final após a aplicação da pressão de compactação (IWAKIRI et al., 2008 citado por FURTADO et al., 2010).

Estudos conduzidos por Sampaio et al. (2010) e Furtado et al. (2010) também evidenciaram o efeito de diferentes pressões de compactação sobre a densidade aparente dos briquetes produzidos com partículas de eucalipto e resíduos madeireiros, respectivamente.

3.7.4 Teor de umidade

Dependendo do tipo de matéria-prima e do processo de compactação, existe uma faixa de teor de umidade na qual o material pode ser compactado adequadamente (GONÇALVES, 2010).

Para que a aglomeração das partículas tenha sucesso, é necessário que a umidade esteja compreendida entre 8 e 15 %. A presença de água no material favorece a transferência de calor, promovendo a plasticização da lignina e, conseqüentemente, a ligação entre as partículas durante a compactação (CARVALHO e BRINCK, 2004). O resíduo muito seco ou acima da umidade indicada produz um briquete com baixa estabilidade dimensional, desfazendo-se quanto estocado ou transportado (QUIRINO, 1991).

O excesso de umidade pode provocar explosões pela formação de vapor d'água e ocasionar o aparecimento de rachaduras ou fissuras no produto final (GONÇALVES, 2010).

3.8 Espécies estudadas

3.8.1 Bracatinga (*Mimosa scabrella* Bentham)

A *Mimosa scabrella* Bentham é popularmente conhecida como bracatinga, espécie pertencente à família Mimosaceae, nativa dos climas mais frios do Brasil (EMBRAPA, 1988).

A espécie encontra-se distribuída entre as latitudes de 23°50'S a 29°40'S e longitudes de 48°50'W a 53°50'W, região que compreende o Estado do Paraná, Santa Catarina, norte do Rio Grande do Sul e pequena porção ao sul do Estado de São Paulo. Existem três variedades de bracatinga: a bracatinga branca, que é mais abundante e apresenta madeira clara; a bracatinga vermelha, mais dura e avermelhada; e a bracatinga argentina, que, apesar do nome vulgar, não ocorre naturalmente na Argentina (EMBRAPA, 1988).

A bracatinga é uma espécie pioneira que se destaca pela abundância e rápido crescimento, atingindo 20 m de altura ou mais algumas vezes, com tronco de até 40 cm de diâmetro na altura do peito (DAP) (FABROWSKI et al., 2005).

A importância da bracatinga como espécie florestal é justificada pela sua ampla utilização, que vai desde seu uso direto como fonte de madeira e lenha até seu uso indireto como planta melífera e para a recuperação de áreas degradadas (CLAUBERG, 2005).

A madeira, moderadamente pesada, possui densidade de 0,67 g cm⁻³, sendo dura ao corte, com média resistência e baixa durabilidade natural. A madeira serrada é empregada na construção civil, para acabamentos internos e, principalmente, para compensados e caixotaria. É ótima para lenha e carvão. A árvore é bastante ornamental, podendo ser empregada com sucesso no paisagismo (LORENZI, 2002).

É usada ainda para embalagens leves, cabos de ferramentas e utensílios domésticos, tacos e tábuas para assoalhos, além de peças para artesanato e marcenaria em geral (CARVALHO, 2003).

3.8.2 Cumaru (*Dipteryx odorata*)

A espécie *Dipteryx odorata* é uma leguminosa da família Fabaceae, conhecida popularmente como cumaru. Também apresenta outros nomes vulgares a depender da região de ocorrência: no Acre e no Pará, cumaru-ferro; no Amazonas, cumaru, cumaru-do-amazonas, cumaru-ferro, cumaru-da-folha-grande, cumaru-roxo, cumaru-verdadeiro, cumbari e sarrapia; no Maranhão, cumari; e no Mato Grosso, Pernambuco e Rondônia, cumaru (CARVALHO, 2008).

Dipteryx odorata ocorre na Bolívia, Colômbia, Guiana, Guiana Francesa, Honduras, Peru e Venezuela. No Brasil, essa espécie ocorre no Acre, Amazonas, Goiás, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Pará e Rondônia (CARVALHO, 2008).

O cumaru é uma espécie arbórea de grande porte, atingindo até 30 m de altura e 60 cm de diâmetro na floresta primária, porém de porte mais baixo quando cultivada ou em florestas secundárias (LOUREIRO et al., 1979).

A madeira do cumaru é densa ($0,95 \text{ g.cm}^{-3}$ a $1,19 \text{ g.cm}^{-3}$) e apresenta resistência ao ataque de fungos e insetos (LOUREIRO et al., 1979; SOUZA et al., 1997). A cor do alburno é diferenciada do cerne, geralmente o alburno é marrom amarelado e o cerne, castanho-avermelhado ou amarelo-rosado. Apresenta difícil processamento mecânico, mas permite excelente acabamento no torneamento, já nos trabalhos de plaina e lixa o acabamento é ruim (CARVALHO, 2008). Devido à natureza oleosa, a madeira apresenta dificuldade em ser colada, mas aceita polimento, pintura e verniz (JANKOWSKY et al., 1990). Pode ser classificada de baixa retratibilidade e alta resistência mecânica, possui cheiro desagradável e grã irregular (JANKOWSKY et al., 1990; LOUREIRO e SILVA, 1968).

Segundo Jankowsky et al. (1990), a madeira é relativamente fácil de secar ao ar, com pequena tendência a rachar superficialmente, apresenta empenamento moderado. A secagem artificial é lenta, porém, praticamente isenta de defeitos.

A espécie é importante para reflorestamentos, frutificando precocemente aos quatro anos de idade. Sua madeira é utilizada para a produção de implementos agrícolas, na construção naval, confecção de cabos de ferramentas, moirões, dormentes, estacas, esteios, tacos para assoalhos,

vigamentos, artigos laminados de marcenaria, bem como buchas de eixo de hélices de embarcações (LOUREIRO et al., 1979).

3.8.3 Peroba mica (*Aspidosperma populifolium*)

As espécies do gênero *Aspidosperma* são encontradas apenas na América, principalmente entre o México e a Argentina, sendo a maioria brasileira (RIZZINI, 1985).

A espécie *Aspidosperma populifolium* pertence à família Apocynaceae, sendo distribuída naturalmente na região amazônica e no Centro-Oeste do Brasil, nos estados do Amazonas, Pará, Rondônia e Mato Grosso. Ocorre principalmente nas Florestas Ombrófilas Densas e Abertas, Submontanas, e dificilmente ultrapassa 30 m de altura, podendo alcançar até 75 cm de diâmetro. Apresenta fuste alto e muito cilíndrico, com a copa geralmente concentrada no ápice da árvore (LOGSDON et al. 2008). As árvores são decíduas e caracterizadas pela presença de látex branco. A casca é espessa, áspera e profundamente fissurada (RIZZINI, 1985).

Segundo Logsdon et al. (2008), a madeira de peroba mica é densa, aproximadamente $0,73 \text{ g.cm}^{-3}$, o cerne apresenta uma coloração marrom-acastanhado claro, com veios mais escuros, sendo pouco distinto do alburno, que geralmente é mais claro. É resistente ao ataque de fungos e xilófagos. Sua madeira é muito utilizada na construção civil, como vigas, caibros e ripas para pisos, e na indústria de carpete de madeira, como lâmina de capa, na fabricação de móveis de qualidade superior, em acabamento de interiores e para fabricação de portas e batentes.

Estudos realizados por Logsdon et al. (2008) mostram que a madeira de peroba mica possui elevada resistência mecânica e pode ser utilizada em estruturas de madeira de grande porte.

3.8.4 *Eucalyptus* sp.

O gênero *Eucalyptus* pertence à família Myrtaceae, com mais de setecentas espécies. Ocorre naturalmente na Austrália e as espécies são adaptadas às diversas condições de clima e solo. A madeira geralmente é

pesada, resistente, com textura fina e baixa estabilidade dimensional (OLIVEIRA et al. 1999).

É um gênero de fácil dispersão devido à alta capacidade de regeneração por brotação e adaptação a diferentes condições ambientais (PIRES, 2007). É representado por árvores com alta taxa de crescimento, grande capacidade de adaptação às condições ambientais, forma retilínea do fuste, desrama natural e madeira com variações nas propriedades tecnológicas, adaptadas às mais variadas condições de uso (OLIVEIRA et al. 1999).

A madeira do gênero *Eucalyptus* tem-se prestado a uma série de finalidades. Além dos usos tradicionais, como lenha, estacas, moirões, dormentes, carvão vegetal, celulose e papel, chapas de fibras e de partículas, há uma forte tendência em utilizá-la, também, na fabricação de casas, móveis e estruturas (PEREIRA et al., 2000).

O eucalipto chegou ao Brasil em 1825, como planta ornamental. Sua utilização para fins econômicos só teve início em 1903, quando passou a ser empregado na produção de dormentes ferroviários e lenha para alimentar as locomotivas da época (PIRES, 2007).

A área de plantios florestais com *Eucalyptus* no Brasil, em 2010, totalizou 4.754.334 ha, 55,8 % concentrados na região sudeste. Para o mesmo ano, tem-se a distribuição da área plantada por estado, em que Minas Gerais, São Paulo, Bahia, Mato Grosso do Sul, Rio Grande do Sul, Espírito Santo e Paraná detinham 86,1% dos plantios de eucalipto (ABRAF, 2011).

As espécies de eucaliptos mais utilizadas no mundo são o *E. grandis*, *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E. urophylla*, *E. saligna* e *E. citriodora* (BARCELLOS, 2007).

O *Eucalyptus grandis* é uma das espécies mais cultivadas no Brasil por apresentar rápido crescimento, elevada produtividade e grande capacidade de adaptação às condições ambientais. Sua madeira apresenta usos múltiplos, densidade básica em torno de 500 kg/m³, medianamente leve, com textura média, baixa estabilidade dimensional, coloração rósea, grã direita, com gosto e cheiro indistintos (BARCELLOS, 2007).

O *Eucalyptus grandis* vem sendo cultivado intensivamente no Brasil com o objetivo principal de atender às demandas do setor de celulose e papel, chapas duras e painéis aglomerados, bem como ao setor de carvão vegetal para uso siderúrgico e metalúrgico (SILVA, 2002).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Local e matéria-prima

A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, pertencente ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, situada no município de Viçosa, Minas Gerais.

As partículas utilizadas para a produção de briquetes foram provenientes de madeiras tratadas termicamente por Araújo (2010), doadas pela empresa Indusparket, localizada na cidade Tietê, São Paulo, fabricante nacional de pisos de madeira maciça. Foram utilizadas cinco espécies de diferentes densidades: Bracatinga, Cumaru, *Eucalyptus grandis*, Peroba mica e *Eucalyptus sp.* (Tabela 1). Amostras destas madeiras medindo 60 x 7,5 x 2,0 cm foram aquecidas nas temperaturas de 180, 200 e 220 °C, durante sessenta minutos para cada temperatura, em uma estufa com controle de temperatura, pressão e vácuo. A estufa era inicialmente evacuada e, posteriormente, preenchida com nitrogênio.

Tabela 1 – Valores médios da densidade básica das espécies

Espécies	Densidade (g cm ⁻³)
Bracatinga (<i>Mimosa scabrella</i> Bentham)	0,55
Cumaru (<i>Dipteryx odorata</i>)	0,90
<i>Eucalyptus grandis</i>	0,52
Peroba mica (<i>Aspidosperma populifolium</i>)	0,61
<i>Eucalyptus sp.</i>	0,63

Fonte: Araújo (2010).

Para a produção dos briquetes, as madeiras tratadas termicamente foram transformadas em palitos e, posteriormente, em partículas.

Para obtenção das partículas, o material foi triturado em um moinho martelo e posteriormente peneirado em peneira com malha de 4 mm, recolhendo-se a fração passante para a produção dos briquetes. Seu comprimento e espessura média foram calculados medindo-se com um paquímetro 30 partículas por tratamento, selecionadas ao acaso (Tabela 2).

Tabela 2 – Valores médios das dimensões das partículas.

Espécies	Temperatura (°C)	Tamanho das partículas (mm)	
		Comprimento	Espessura
Bracatinga	Testemunha	0,72	0,06
	180	0,67	0,06
	200	1,09	0,07
	220	0,69	0,06
Cumarú	Testemunha	1,18	0,06
	180	0,85	0,05
	200	0,67	0,06
	220	0,78	0,05
<i>E. grandis</i>	Testemunha	0,85	0,06
	180	0,85	0,04
	200	0,82	0,06
	220	1,02	0,06
Peroba mica	Testemunha	0,70	0,05
	180	0,61	0,06
	200	0,73	0,04
	220	0,79	0,06
<i>Eucalyptus sp.</i>	Testemunha	0,81	0,05
	180	0,79	0,06
	200	0,80	0,06
	220	0,70	0,06

4.2 Propriedades das partículas tratadas termicamente

4.2.1 Umidade de equilíbrio higroscópico das partículas

Para determinar a umidade de equilíbrio higroscópico das partículas, elas foram colocadas em uma câmara climática a 20 °C e 65 % de umidade relativa até atingir massa constante. O teor de umidade foi calculado de acordo a norma ABNT NBR 9484 (1986). A umidade de equilíbrio higroscópico das partículas foi determinada para obter a umidade de trabalho para produção dos

briquetes. Na Tabela 3, encontram-se os valores médios de umidade de equilíbrio higroscópico (U.E.H) das partículas.

Tabela 3 – Valores médios de umidade de equilíbrio higroscópico das partículas tratadas termicamente.

Espécies	Temperatura (°C)	U.E.H (%)
Bracatinga	Testemunha	13,39
	180	10,16
	200	9,79
	220	9,75
Cumaru	Testemunha	11,18
	180	9,88
	200	9,71
	220	8,88
<i>E. grandis</i>	Testemunha	11,90
	180	10,94
	200	11,12
	220	11,42
Peroba mica	Testemunha	10,92
	180	9,99
	200	10,13
	220	9,54
<i>Eucalyptus sp.</i>	Testemunha	12,86
	180	11,38
	200	10,54
	220	11,88

4.2.2 Poder calorífico superior

O poder calorífico superior das partículas foi determinado de acordo com a metodologia descrita na norma da ABNT NBR 8633 (1984), utilizando-se uma bomba calorimétrica adiabática. As amostras foram moídas em um moinho de facas Thomas Wiley - modelo 4 e depois, peneiradas. O material utilizado para análise foi o que ficou retido entre as peneiras de 40 e 60 mesh. A combustão da amostra se processou em ambiente fechado, na presença de oxigênio e sob pressão. O poder calorífico é obtido a partir da diferença de temperatura da água antes e após a combustão.

4.2.3 Análise química imediata

A composição química imediata foi obtida em amostras de madeira moídas e peneiradas até uma granulometria de, aproximadamente, 0,2 mm, seguindo os procedimentos preconizados pela norma ABNT NBR 8112 (1983)

para determinação do teor de matérias voláteis, cinzas e carbono fixo, em base seca.

4.3 Produção de briquetes

Os briquetes foram produzidos em briquetadeira de laboratório marca Lippel, modelo LB-32, a uma temperatura de 120 °C, tempo de prensagem de 7 minutos e tempo de resfriamento de 6 minutos e pressões iguais a 70,3; 105,4 ou 140,6 kgf/cm². A massa de partículas utilizada para produção de cada briquete foi igual a 17 gramas na umidade de equilíbrio higroscópico médio (Tabela 3).

As condições de briquetagem foram definidas experimentalmente a partir de testes preliminares de tempo de prensagem e tempo de resfriamento. Os tempos escolhidos foram aqueles nos quais se obtiveram briquetes sem rachaduras ou fissuras. A escolha da temperatura foi em função da plasticização da lignina, que contribui para a aglomeração das partículas e, conseqüentemente, para a resistência dos briquetes.

4.4 Determinação das propriedades físicas e mecânica dos briquetes

Para determinar a qualidade dos briquetes e o efeito da pressão de compactação, inicialmente procedeu-se às análises visuais e, posteriormente, foram determinadas as propriedades físicas e mecânica.

As observações visuais foram feitas após o resfriamento e durante as medições de altura e diâmetro dos briquetes. Foi observada a presença ou ausência de rachaduras, fissuras e deformações nas laterais dos briquetes nos diferentes tratamentos.

4.4.1 Análises da perda de massa no processo de briquetagem, taxa de retorno e absorção de água dos briquetes

Para avaliar a perda de massa durante a fabricação dos briquetes, foram pesados aproximadamente 17 g de partículas de madeira em balança de precisão e determinada a massa do briquete após o resfriamento, obtendo-se, por diferença, a perda de massa no processo.

Para determinar a taxa de retorno, bem como a absorção de água dos briquetes, foram medidos o comprimento, o diâmetro e a massa após o

resfriamento. A seguir, eles foram acondicionados em uma câmara climática, a uma temperatura de 20 °C e 65 % de umidade relativa, até atingir massa constante. Após a estabilização, foram medidos novamente o comprimento, o diâmetro e a massa. A taxa de retorno foi calculada dividindo-se a diferença pela dimensão inicial e multiplicando por 100.

A absorção foi obtida pela diferença entre as duas pesagens, expressa em porcentagem.

4.4.2 Umidade de equilíbrio higroscópico dos briquetes

A umidade de equilíbrio higroscópico dos briquetes foi determinada em uma câmara climática à temperatura de 20 °C e 65 % de umidade relativa, de acordo com a norma ABNT NBR 9484 (1986).

4.4.3 Densidade aparente e densidade energética dos briquetes

A densidade aparente foi determinada pela pesagem e posterior imersão dos briquetes em mercúrio, obtendo-se o volume deslocado conforme o método da balança hidrostática descrito por Vital (1984).

A densidade energética foi calculada multiplicando-se o poder calorífico superior pela densidade aparente dos briquetes.

4.4.4 Carga de ruptura dos briquetes

A carga de ruptura foi determinada empregando-se uma máquina de ensaio universal modelo LOSENHAUSEN, na qual os briquetes foram comprimidos contínua e progressivamente a uma velocidade de 3,5 mm min⁻¹ até a ruptura. A carga máxima de ruptura do briquete foi obtida através de um software. Foi utilizada a metodologia adaptada da norma ABNT NBR ISO 11093-9, uma vez que não existe norma específica para briquetes.

4.5 Delineamento experimental

As propriedades da madeira tratada termicamente foram analisadas segundo um delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial, com cinco espécies (*Eucalyptus grandis*, Bracatinga, Peroba mica, *Eucalyptus sp.* e Cumaru) e quatro temperaturas (testemunha-25°C, 180°C, 200°C e 220°C), com 3 repetições, totalizando 20 tratamentos e 60 unidades amostrais. Os resultados foram interpretados com auxílio de análise de variância (ANOVA) a 5% de probabilidade, observando-se diferenças significativas entre os tratamentos, tendo sido as médias comparadas pelo teste TUKEY a 5% de probabilidade.

Os briquetes foram fabricados empregando-se pressões iguais a 70,3; 105,4 e 140,6 kgf/cm² com 5 repetições, totalizando 300 unidades amostrais. Os resultados foram interpretados com auxílio de análise de variância (ANOVA) a 5% de probabilidade, observando-se diferenças significativas entre os tratamentos, tendo sido as médias comparadas pelo teste TUKEY a 5% de probabilidade.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Propriedades das partículas tratadas termicamente

5.1.1 Matérias Voláteis

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios das matérias voláteis em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies.

A análise de variância indicou que o teor de matérias voláteis foi afetado pelos tratamentos, ocorrendo interações significativas entre a temperatura de tratamento térmico e as espécies. Houve também efeito isolado da temperatura e das espécies.

Tabela 4 – Valores médios das matérias voláteis (%) das partículas em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies.

Espécies	Temperatura (°C)				Média
	Testemunha	180	200	220	
<i>Eucalyptus grandis</i>	88,19 bA	84,46 cA	90,17 aA	90,34 aA	88,29 A
Bracatinga	82,50 bC	84,82 aA	84,75 aB	83,25 abB	83,83 C
Peroba mica	86,76 aAB	85,31abA	84,65 bB	83,60 bB	85,08 B
<i>Eucalyptus sp.</i>	86,13 aB	84,73 abA	84,97 abB	83,39 bB	84,81 B
Cumaru	83,97 aC	81,00 bB	79,80 bC	83,78 aB	82,13 D
Média	85,51 a	84,06 b	84,87 ab	84,87 ab	

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas para a temperatura e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas para a espécie não diferem significativamente entre si. Valores e letras em negrito representam a média geral. Todos a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

O percentual de matérias voláteis das partículas, independentemente da temperatura de tratamento térmico e das espécies, variou entre 79,80 e 90,34

%. Segundo Morais et al. (2004), nos combustíveis sólidos como a madeira, a quantidade de material volátil varia entre 76 e 86 % em base seca, sendo responsável pela maior parte da geração de calor na combustão. No entanto, ressalta-se que essa faixa mencionada pelos autores é variável em função da composição química de cada material. Assim, salienta-se que as espécies com maiores percentuais de matérias voláteis se queimam mais rapidamente e que o carbono fixo resultante libera a energia mais lentamente, referente à fração de material que se queima no estado sólido.

Avaliando o efeito da temperatura de tratamento térmico, observa-se que, de modo geral, com o aumento da temperatura, o percentual de matérias voláteis presentes foi reduzido, exceto para o *Eucalyptus grandis*, em que foram obtidos, de forma significativa, os maiores percentuais nas temperaturas de 200 e 220 °C. Era esperado que à medida que se aumentasse a temperatura menor seria o percentual de voláteis, o que não aconteceu para a madeira de *Eucalyptus grandis*, provavelmente devido à heterogeneidade do material e à fração da madeira que não foi totalmente torrificada. No trabalho de Rodrigues (2009), a madeira de *Eucalyptus grandis* sob diferentes tratamentos térmicos teve uma redução das matérias voláteis com o aumento da temperatura, sendo encontrados percentuais de 80,15 % para a testemunha e de 79,32 % na temperatura de 220 °C.

O percentual de matérias voláteis também foi afetado pelas espécies, tendo as partículas de *Eucalyptus grandis* e Cumaru apresentado valores médios de 88,29 e 82,13 %, respectivamente, sendo esses significativamente diferentes dos demais. Essa variação se deve, provavelmente, à composição química da madeira de cada espécie. Já entre as partículas provenientes das madeiras de Peroba mica e *Eucalyptus sp.*, não houve diferença significativa.

Segundo Brito e Barrichelo (1978), a madeira de *Eucalyptus grandis* apresenta 89,9 % de matérias voláteis, valor próximo ao encontrado neste trabalho. Feitosa Netto et al. (2006), estudando a espécie Cumaru, encontraram para as matérias voláteis o valor equivalente a 86,65 %. Cintra (2009), avaliando espécies florestais nativas, obteve valores entre 79,6 e 84,9 %.

Vale et al. (2002) estudaram espécies do cerrado e observaram os percentuais de voláteis variando de 74,62 a 81,2 %. Paula (2010), ao analisar resíduos madeireiros para briquetagem, verificou para essa variável valores

entre 78,89 e 83,19 %. No entanto, em estudo desenvolvido por Rodrigues (2010), avaliando também resíduos de madeira, foi observado valor médio de 86,8 % de matérias voláteis.

5.1.2 Teor de Cinzas

Na Tabela 5 são apresentados os valores médios do teor de cinzas em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies.

A análise de variância indicou que o teor de cinzas foi afetado pelos tratamentos, ocorrendo interações significativas entre a temperatura e as espécies. Verificou-se efeito isolado para a espécie.

Tabela 5 – Valores médios do teor de cinzas (%) das partículas em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies.

Espécies	Temperatura (°C)				Média
	Testemunha	180	200	220	
<i>Eucalyptus grandis</i>	0,81 aAB	0,42 bB	0,79 aA	0,86 aA	0,72 A
Bracatinga	0,51 aB	0,64 aAB	0,46 aB	0,56 aAB	0,54 B
Peroba mica	0,65 aAB	0,64 aAB	0,80 aA	0,63 aAB	0,68 AB
<i>Eucalyptus sp.</i>	0,82 aA	0,92 aA	0,83 aA	0,69 aAB	0,81 A
Cumarú	0,59 aAB	0,46 aB	0,57 aAB	0,54 aB	0,54 B

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas para a temperatura e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas para a espécie não diferem significativamente entre si. Valores e letras em negrito representam a média geral. Todos a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

O teor de cinzas é um parâmetro importante quando se utiliza a madeira ou seus derivados para energia, pois afeta negativamente o poder calorífico da biomassa e aumenta a frequência de limpeza dos cinzeiros das fornalhas, bem como acarreta corrosão de metais.

Neste estudo, independentemente da espécie e da temperatura de tratamento térmico, os valores médios variaram de 0,42 a 0,92 %, estando em consonância com Browning (1963) e Barcellos et al. (2005), que relatam teores de cinzas na madeira correspondente em geral a menos que 1% na base absolutamente seca.

Observa-se que não houve efeito da temperatura de tratamento térmico no teor de cinzas, independentemente da espécie, quando comparada à testemunha, exceto para a madeira de *Eucalyptus grandis* na temperatura de

180 °C. Já era esperado que não houvesse influência da temperatura nos resultados, pois as cinzas se referem à fração inorgânica do material, sendo necessárias temperaturas maiores para sua fusão ou degradação.

Analisando o efeito das espécies, independentemente da temperatura de tratamento térmico, observou-se que os maiores valores percentuais de cinzas foram encontrados para a madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus sp.*, que não diferiram significativamente entre si. Esse comportamento possivelmente ocorreu por ambas as madeiras pertencerem ao mesmo gênero, podendo ser uma característica específica dele, também podendo estar relacionado à adubação, muito comum no cultivo do eucalipto. Para a Bracatinga e o Cumaru, os teores de cinzas não diferiram entre si e tiveram valor médio de 0,54 %.

Em estudos realizados por Brito e Barrichelo (1978) com espécies de eucalipto, os autores observaram que os teores de cinzas variaram de 0,30 a 0,53%. Rodrigues (2009) verificou, para a madeira de *Eucalyptus grandis* sem tratamento e tratada termicamente a 220 °C, valores equivalentes a 0,29 e 0,15%, respectivamente. Segundo o mesmo autor, essa diferença entre os valores da testemunha e a madeira tratada pode ser atribuída a alguma contaminação prévia da madeira, que foi eliminada na torrefação e persistiu na madeira natural. Observa-se que os resultados citados são inferiores aos observados neste trabalho, os quais podem ser explicados por algumas razões, entre as quais se destacam as diferentes procedências da espécie, cultivos distintos e até mesmo a contaminação da madeira por resíduos do solo.

Rodrigues (2010) observou nos resíduos de madeira valores médios de 0,77% para o teor de cinzas. Paula (2010), analisando resíduos madeireiros, encontrou teores de cinzas entre 0,13 e 0,18 %. Esses diversos valores evidenciam que o teor de cinzas é inerente a cada tipo de material.

5.1.3 Carbono fixo

Na Tabela 6 são apresentados os valores médios do teor de carbono fixo em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies.

Tabela 6 – Valores médios do teor de carbono fixo (%) das partículas em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies.

Espécies	Temperatura (°C)				Média
	Testemunha	180	200	220	
<i>Eucalyptus grandis</i>	11,00 bB	15,12 aB	9,04 cC	8,81 cB	10,99 D
Bracatinga	16,99 aA	14,55 bB	14,79 bB	16,19 abA	15,63 B
Peroba mica	12,59 bB	14,05 abB	14,56 aB	15,77 aA	14,24 C
<i>Eucalyptus sp.</i>	13,05 bB	14,35 abB	14,20 abB	15,92 aA	14,38 C
Cumarú	15,45 bA	18,54 aA	19,63 aA	15,68 bA	17,33 A
Média	13,82 b	15,32 a	14,44 b	14,47 ab	

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas para a temperatura e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas para a espécie não diferem significativamente entre si. Valores e letras em negrito representam a média geral. Todos a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

A queima do carbono fixo, em forma de brasa incandescente, é o último estágio da reação de combustão, e quando se dá a sua queima a energia é liberada lentamente. Vale ressaltar que o teor de carbono fixo é um parâmetro também utilizado na avaliação do carvão vegetal para uso siderúrgico.

Os valores médios do teor de carbono fixo neste estudo, independentemente da espécie e da temperatura de tratamento térmico, variaram de 8,81 a 19,63 %. Segundo Brito e Barrichelo (1982), a madeira possui um baixo teor de carbono fixo, com valores variando entre 15 a 25 %.

O teor de carbono fixo é uma relação inversamente proporcional ao percentual de matérias voláteis. Assim, pode-se observar que os menores teores de carbono fixo foram observados nas partículas provenientes da madeira de *Eucalyptus grandis*, nas temperaturas de 200 e 220 °C, nas quais foram observados os maiores valores de matérias voláteis (Tabela 4).

De modo geral, houve um aumento do teor de carbono fixo em função do aumento da temperatura de tratamento térmico, principalmente para as espécies Peroba mica, *Eucalyptus sp.* e Cumarú, exceto na temperatura de 220 °C para essa última espécie. Este aumento ocorreu, provavelmente, devido ao alto teor de extrativos voláteis presente nesta madeira, que por sua vez sofre influência do tratamento térmico. Os resultados estão de acordo com Rodrigues (2009), que, estudando o efeito da torrefação da biomassa para fins energéticos, verificou redução das matérias voláteis e, conseqüentemente, aumento do carbono fixo aliados ao aumento da temperatura de tratamento.

Isto ocorreu devido ao teor de carbono fixo estar associado às matérias voláteis, em que existe uma relação inversamente proporcional.

Ainda na Tabela 6, analisando o efeito isolado da temperatura, observa-se que o maior percentual de carbono fixo foi obtido para as madeiras tratadas na temperatura de 180°C, porém, elas não diferiram significativamente daquelas produzidas à temperatura de 220 °C. De modo geral, observou-se, para as partículas sem tratamento (testemunha), menor valor de carbono fixo.

Os valores médios do teor de carbono fixo para as madeiras de *Peroba mica* e *Eucalyptus sp.* não diferiram significativamente entre si. As partículas provenientes da madeira de Cumaru, de modo geral, apresentaram significativamente os maiores teores de carbono fixo, exceto na temperatura de 220 °C, que diferiu apenas daquelas oriundas da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Segundo Rodrigues (2010), o teor de carbono fixo dos resíduos de madeira apresentou valor médio de 12 %. Brito e Barrichelo (1978), avaliando diferentes espécies de eucalipto, encontraram valores entre 9,6 a 24,3 %. Cintra (2009) observou para as diferentes espécies florestais estudadas teores de carbono fixo variando de 14,4 a 19,6 %. De acordo com Feitosa Netto et al. (2006), a madeira de Cumaru apresentou 13,29 % de carbono fixo, resultado inferior aos valores encontrados neste trabalho, tanto para a testemunha quanto, principalmente, para as madeiras tratadas termicamente. Felfli et al. (2003) avaliaram o efeito da torrefação nos briquetes de resíduos de madeira e encontraram, para os briquetes “in natura” e torreficados na temperatura de 220 °C, valores médios de carbono fixo equivalentes a 18,6 e 19,0 %, respectivamente.

5.1.4 Poder calorífico superior

Na Tabela 7 são apresentados os valores médios do poder calorífico superior em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies.

A análise de variância indicou que o poder calorífico superior foi afetado pelos tratamentos, ocorrendo interações significativas entre a temperatura de tratamento térmico e as espécies. Houve também efeito isolado da temperatura e das espécies.

Tabela 7 – Valores médios do poder calorífico superior (kcal kg⁻¹) das partículas em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies.

Espécies	Temperatura (°C)				Média
	Testemunha	180	200	220	
<i>Eucalyptus grandis</i>	4795 aAB	4678 aA	4789 aA	4881 aA	4786 D
Bracatinga	4678 aAB	4784 aA	4784 aA	4793 aA	4760 E
Peroba mica	5099 aA	5104 aA	5189 aA	5411 aA	5201 A
<i>Eucalyptus sp.</i>	4433 bB	4987 abA	5097 aA	4896 abA	4853 C
Cumaru	5100 aA	4987 aA	5193 aA	5209 aA	5122 B
Média	4821 d	4908 c	5010 b	5038 a	

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas para a temperatura e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas para a espécie não diferem significativamente entre si. Valores e letras em negrito representam a média geral. Todos a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

O poder calorífico da madeira e derivados é influenciado pela sua umidade de trabalho, pois quanto maior a umidade maior será a fase endotérmica da combustão deste combustível. No entanto, quando se avaliam as propriedades intrínsecas da madeira, principalmente, as químicas, verifica-se, conforme diferentes autores, a exemplo de Santos (2010), que os teores de extrativos e de ligninas são os fatores que mais contribuem de forma significativa para aumentar o poder calorífico. Por outro lado, o teor de cinzas afeta negativamente.

Os valores mínimos e máximos de poder calorífico observados neste trabalho foram, respectivamente, de 4433 e 5411 kcal kg⁻¹. Quirino et al. (2005) realizaram um levantamento bibliográfico dos valores de poder calorífico de madeira de espécies florestais e encontraram uma média de 4.732 kcal/kg, sendo observado valor até de 5.260 kcal/kg no limite superior e 3.350 kcal/kg no limite inferior.

De modo geral, observa-se que, independentemente da espécie, o poder calorífico não foi afetado significativamente pelas temperaturas de tratamento térmico. No entanto, verificou-se que o poder calorífico das diferentes espécies apresentou tendência a aumentar com o acréscimo da temperatura.

As partículas sem tratamento (testemunha) das diferentes espécies apresentaram, de maneira geral, valores inferiores de poder calorífico quando comparada às tratadas termicamente. Isso é atribuído ao efeito da temperatura, que promove o aumento do teor de carbono fixo, afetando positivamente o

poder calorífico. Esse incremento obtido nos resultados de poder calorífico confirma aquele encontrado por Felfli (2003), que relata ser o tratamento térmico um meio para melhorar as características energéticas da biomassa e, conseqüentemente, a densidade energética dos briquetes. Além disso, também confere características hidrofóbicas.

Analisando o efeito isolado das espécies, observa-se que o poder calorífico das espécies foi significativamente diferente entre si. Essa diferença no poder calorífico entre as espécies está relacionada com a constituição química da madeira, como, por exemplo, os teores de lignina e extrativos. O poder calorífico das espécies *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus sp.*, provavelmente, foi afetado negativamente pelo elevado teor de cinzas presente na madeira, conforme pode ser observado na Tabela 5. A Peroba mica e o Cumaru foram as madeiras que apresentaram os maiores valores, e isso pode ser atribuído aos extrativos presentes nessas espécies, conforme relatado por Araújo (2010).

Feitosa Netto et al. (2006) e Quirino et al. (2004) encontraram para a madeira de Cumaru valores de poder calorífico de 4810,30 kcal kg⁻¹ e 4828 kcal kg⁻¹, respectivamente, sendo estes valores inferiores aos encontrados neste trabalho. Farinhaque (1981), estudando a madeira de Bracatinga, obteve valores médios de 4566 kcal kg⁻¹.

Vale ressaltar, conforme outros autores, que o poder calorífico da madeira está relacionado com suas características intrínsecas. Por exemplo, Frederico (2009), estudando o efeito de diferentes regiões do Estado de Minas Gerais na qualidade da madeira de eucalipto para energia, verificou que o poder calorífico variou de 4626 a 4712 kcal kg⁻¹. Entretanto, Lima et al. (2011) avaliaram as características da madeira de *Eucalyptus benthamii*, tendo observado poder calorífico de 4681 kcal kg⁻¹. Já Rodrigues (2009), analisando também a madeira de eucalipto sob diferentes tratamentos térmicos, encontrou para a madeira sem tratamento valor igual a 4674,30 kcal kg⁻¹ e, para madeira tratada termicamente a 220 °C, valor médio de 4858,21 kcal kg⁻¹. Cintra (2009) verificou para as diferentes espécies florestais valores entre 4511 e 4769 kcal kg⁻¹. Rodrigues (2010), trabalhando com resíduos madeireiros, obteve poder calorífico superior igual a 4630 kcal kg⁻¹.

5.2 Propriedades dos briquetes

5.2.1 Aspectos visuais

Para os diferentes tratamentos realizados, não se observou presença de rachaduras ou fissuras e deformações nas laterais dos briquetes, atendendo às exigências para a sua comercialização, principalmente quando do seu manuseio, transporte e armazenamento. Essa conformidade observada se deve à temperatura de 120 °C utilizada durante o processo de compactação, que permitiu a plasticização da lignina, e também às pressões aplicadas, que permitiram um maior contato entre as partículas.

5.2.2 Taxa de retorno no comprimento e diâmetro dos briquetes

A taxa de retorno dos briquetes após o processo de compactação afeta o armazenamento e o transporte. Além disso, a variação das dimensões interfere diretamente no planejamento de utilização dos briquetes, pois essa variável tem relação direta com a resistência.

Na Tabela 8 são apresentados os valores médios da taxa de retorno no comprimento dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e da pressão de compactação.

Tabela 8 - Valores médios da taxa de retorno no comprimento (%) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e da pressão de compactação.

Temperatura (°C)	Pressão (kgf/cm ²)			Média
	70,3	105,4	140,6	
Testemunha	9,08 aA	6,66 bB	6,39 bB	7,38 B
180	7,82 aB	8,34 aA	7,65 aA	7,94 A
200	6,96 aBC	5,71 abC	6,24 bB	6,30 C
220	6,02 aC	5,00 bC	6,20 aB	5,74 D
Média	7,47 a	6,43 b	6,62 b	

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas para a pressão e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas para a temperatura não diferem significativamente entre si. Valores e letras em negrito representam a média geral. Todos a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Os valores mínimos e máximos da taxa de retorno no comprimento dos briquetes foram iguais a 5,00 e 9,08 %, respectivamente.

De modo geral, a maior variação do comprimento foi encontrada para os briquetes produzidos na pressão de 70,3 kgf/cm² pela ocorrência de maior quantidade de espaços vazios, tendo esses briquetes maior área superficial, tornando-se mais higroscópicos, conseqüentemente, menos estáveis.

Avaliando o efeito isolado da temperatura, observa-se que os briquetes produzidos com as partículas tratadas na temperatura de 200 e 220 °C apresentaram as menores variações no comprimento. Isto provavelmente se deve ao efeito das temperaturas nas madeiras, que sofreram redução da higroscopicidade.

Na Tabela 9 são apresentados os valores médios da taxa de retorno no comprimento dos briquetes em função da temperatura de torrefação e das espécies estudadas.

Tabela 9 – Valores médios da taxa de retorno no comprimento (%) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies.

Espécies	Temperatura (°C)				Média
	Testemunha	180	200	220	
<i>Eucalyptus grandis</i>	14,15 aA	8,81 bB	5,14 cB	4,32 cC	8,11 B
Bracatinga	6,45 cB	10,16 bA	12,26 aA	7,54 cA	9,10 A
Peroba mica	5,05 cC	10,87 aA	5,36 cB	6,91 bAB	7,05 C
<i>Eucalyptus sp.</i>	4,02 bC	6,28 aC	5,90 aB	5,67 aB	5,47 D
Cumarú	7,22 aB	3,56 bcD	2,85 cC	4,26 bC	4,47 E
Média	7,38 b	7,94 a	6,30 c	5,74 d	

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas para a temperatura e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas para a espécie não diferem significativamente entre si. Valores e letras em negrito representam a média geral. Todos a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Os valores médios da taxa de retorno no comprimento dos briquetes, independentemente da espécie e da temperatura de tratamento térmico, variaram de 2,85 e 14,15 %.

Avaliando o efeito da temperatura do tratamento térmico na taxa de retorno no comprimento dos briquetes, observa-se que, para as espécies *Eucalyptus grandis* e Cumarú, obteve-se o resultado esperado, ou seja, menor expansão do comprimento com o aumento da temperatura. Isto se deve provavelmente à menor higroscopicidade das madeiras tratadas termicamente.

A taxa de retorno no comprimento foi significativamente diferente entre as espécies estudadas, tendo sido o menor retorno observado para os

briquetes produzidos com partículas de Cumaru. Essa variação pode ser devida à composição química de cada madeira, à umidade de equilíbrio dos briquetes e à geometria das partículas.

Na Tabela 10 são apresentados os valores médios da taxa de retorno no comprimento dos briquetes em função da pressão de compactação e das espécies.

Tabela 10 – Valores médios da taxa de retorno no comprimento (%) dos briquetes em função da pressão de compactação e das espécies.

Espécies	Pressão (kgf/cm ²)			Média
	70,3	105,4	140,6	
<i>Eucalyptus grandis</i>	8,73 aA	8,13 abA	7,46 bB	8,11 B
Bracatinga	9,30 aA	8,86 aA	9,15 aA	9,10 A
Peroba mica	9,04 aA	5,24 cB	6,86 bB	7,05 C
<i>Eucalyptus sp.</i>	5,57 aB	5,34 aB	5,49 aC	5,47 D
Cumaru	4,71 aB	4,57 aB	4,13 aD	4,47 E
Média	7,47 a	6,43 b	6,62 b	

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas para a pressão e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas para a espécie não diferem significativamente entre si. Valores e letras em negrito representam a média geral. Todos a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Os valores mínimos e máximos da taxa de retorno no comprimento dos briquetes foram iguais a 4,13 e 9,30 %, respectivamente.

De modo geral, a taxa de retorno no comprimento dos briquetes não foi afetada pela pressão de compactação, exceto para a espécie Peroba mica. Avaliando o efeito isolado da pressão de compactação, verifica-se que os briquetes produzidos na pressão de 70,3 kgf/cm² obtiveram as maiores expansões em comprimento.

A maior taxa de retorno no comprimento foi observada para os briquetes produzidos com partículas de Bracatinga, que foram significativamente diferentes das demais.

Alguns fatores podem ter contribuído para a variação do comprimento dos briquetes, entre os quais se destacam a umidade de equilíbrio higroscópico das partículas, o tamanho das partículas, a temperatura, o tempo e a pressão de compactação, além do tipo de matéria-prima.

Na Tabela 11 são apresentados os valores médios da taxa de retorno no diâmetro dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e da pressão de compactação.

Tabela 11 – Valores médios da taxa de retorno no diâmetro (%) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e da pressão de compactação.

Temperatura (°C)	Pressão (kgf/cm ²)			Média
	70,3	105,4	140,6	
Testemunha	0,93 aA	0,74 bA	0,65 bA	0,78 A
180	0,61 aBC	0,67 aAB	0,69 aA	0,66 B
200	0,72 aB	0,35 bC	0,62 aA	0,56 B
220	0,51 aC	0,53 aBC	0,65 aA	0,57 B
Média	0,69 a	0,57 b	0,66 ab	

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas para a pressão e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas para a temperatura não diferem significativamente entre si. Valores e letras em negrito representam a média geral. Todos a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Os valores médios da taxa de retorno no diâmetro dos briquetes variaram entre 0,35 e 0,93 %.

Observa-se que a taxa de retorno no diâmetro dos briquetes produzidos com partículas tratadas termicamente não foi influenciada pela pressão de compactação, exceto aqueles produzidos a 105,4 kgf/cm² com partículas tratadas na temperatura de 200 °C.

Avaliando o efeito isolado da temperatura, verifica-se que os valores médios da taxa de retorno no diâmetro não foram significativos entre as temperaturas de torrefação, entretanto, todas elas diferiram da testemunha, que obteve a maior expansão. Isto pode ser justificado pela elevada umidade de equilíbrio higroscópico das partículas não tratadas termicamente utilizadas na produção dos briquetes.

Na Tabela 12 são apresentados os valores médios da taxa de retorno no diâmetro dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies.

Tabela 12 – Valores médios da taxa de retorno no diâmetro (%) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies.

Espécies	Temperatura (°C)				Média
	Testemunha	180	200	220	
<i>Eucalyptus grandis</i>	0,97 aA	0,70 bAB	0,64 bB	0,47 bA	0,70 AB
Bracatinga	0,76 aAB	0,87 aA	0,91 aA	0,70 aA	0,81 A
Peroba mica	0,72 aAB	0,60 abBC	0,45 bBC	0,66 abA	0,61 BC
<i>Eucalyptus sp.</i>	0,56 aB	0,43 aC	0,52 aBC	0,49 aA	0,50 C
Cumarú	0,87 aA	0,68 abABC	0,29 cC	0,49 bcA	0,58 BC
Média	0,78 a	0,66 b	0,56 b	0,57 b	

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas para a temperatura e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas para a espécie não diferem significativamente entre si. Valores e letras em negrito representam a média geral. Todos a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Os valores mínimos e máximos da taxa de retorno no diâmetro dos briquetes foram iguais a 0,29 e 0,97 %, respectivamente.

De modo geral, era esperado que não houvesse diferença entre os tratamentos para a taxa de retorno no diâmetro, uma vez que as partículas ao serem comprimidas pelos pistões metálicos da briquetadeira ficam prensadas e em contato direto com as laterais da parede da câmara de compressão. Deste modo, a parede obriga as partículas a se arranjar de forma a se expandir longitudinalmente. Além disso, as laterais da câmara são aquecidas, o que aumenta a área de troca de calor, beneficiando a estabilidade dimensional em diâmetro. Entretanto, verifica-se, de modo geral, que a variação do diâmetro dos briquetes produzidos com partículas tratadas termicamente foi menor em relação aos produzidos com partículas não tratadas.

A maior taxa de retorno no diâmetro foi observada para os briquetes produzidos com partículas de Bracatinga, o que pode ser explicado pela geometria das partículas, bem como pela sua distribuição e arranjo na câmara de compressão.

Na Tabela 13 são apresentados os valores médios da taxa de retorno no diâmetro dos briquetes em função da pressão de compactação e das espécies.

Tabela 13 – Valores médios da taxa de retorno no diâmetro (%) dos briquetes em função da pressão de compactação e das espécies.

Espécies	Pressão (kgf/cm ²)			Média
	70,3	105,4	140,6	
<i>Eucalyptus grandis</i>	0,76 aA	0,66 aB	0,66 aAB	0,70 AB
Bracatinga	0,76 aA	0,91 aA	0,76 aA	0,81 A
Peroba mica	0,71 aAB	0,43 bCD	0,68 aAB	0,61 BC
<i>Eucalyptus sp.</i>	0,53 aB	0,26 bD	0,71 aA	0,50 C
Cumarú	0,70 aAB	0,59 abBC	0,46 bB	0,58 BC
Média	0,69 a	0,57 b	0,66 ab	

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas para a pressão e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas para a espécie não diferem significativamente entre si. Valores e letras em negrito representam a média geral. Todos a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Os valores médios da taxa de retorno no diâmetro dos briquetes variaram entre 0,26 e 0,91 %.

Observou-se que a taxa de retorno no diâmetro dos briquetes não foi afetada pela pressão de compactação, exceto para aqueles produzidos com partículas de Peroba mica, *Eucalyptus sp.* e Cumarú.

Analisando o efeito das espécies, de modo geral, a variação no diâmetro foi menor nos briquetes produzidos com a madeira de *Eucalyptus sp.*, que não diferiu significativamente dos briquetes produzidos com partículas de Peroba mica e Cumarú. Diante disso, observa-se a influência das diferentes matérias-primas utilizadas no processo de compactação. Isto pode ser verificado no estudo realizado por Rodrigues (2010), que, trabalhando com briquetes de diferentes resíduos, verificou maior expansão em diâmetro nos briquetes produzidos apenas com lodo biológico e temperatura de 120 °C.

5.2.3 Perda de massa

O estudo da perda de massa dos briquetes ocorre, principalmente, pela evaporação de água e volatilização de extrativos durante o processo de compactação. Esta propriedade afeta o transporte em função da massa a ser transportada.

Na Tabela 14 são apresentados os valores médios da perda de massa em função da temperatura de tratamento térmico e da pressão de compactação.

Tabela 14 – Valores médios da perda de massa (%) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e da pressão de compactação.

Temperatura (°C)	Pressão (kgf/cm ²)			Média
	70,3	105,4	140,6	
Testemunha	4,60 aA	4,18 bA	4,35 bA	4,38 A
180	3,57 aC	3,34 bB	3,73 aC	3,55 D
200	4,29 aB	4,18 abA	4,04 bB	4,17 B
220	4,15 aB	4,00 abA	3,93 bBC	4,02 C
Média	4,15 a	3,93 b	4,01 b	

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas para a pressão e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas para a temperatura não diferem significativamente entre si. Valores e letras em negrito representam a média geral. Todos a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Os valores médios da perda de massa, independentemente da pressão de compactação e da temperatura de tratamento térmico, variaram de 3,34 a 4,60 %.

De modo geral, observa-se redução na perda de massa dos briquetes com o aumento da pressão, principalmente para aqueles produzidos com partículas sem tratamento e com partículas tratadas termicamente a 200 e 220 °C.

Para a testemunha, foram observados os maiores percentuais da perda de massa, causados principalmente pela evaporação de água durante o processo de compactação.

As maiores perdas de massa foram observadas para a pressão de 70,3 kgf/cm², independentemente da temperatura de tratamento térmico. Isto pode ser explicado pela menor taxa de compactação, que promove maior quantidade de espaços vazios entre as partículas, assim permitindo a evaporação da água mais facilmente.

Na Tabela 15 são apresentados os valores médios da perda de massa em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies.

Tabela 15 – Valores médios da perda de massa (%) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies.

Espécies	Temperatura (°C)				Média
	Testemunha	180	200	220	
<i>Eucalyptus grandis</i>	3,20 dD	3,62 cB	6,03 aA	5,49 bA	4,58 A
Bracatinga	5,50 aA	3,57 bcB	3,40 cC	3,78 bC	4,06 B
Peroba mica	4,11 aB	2,82 cC	3,96 aB	3,30 bD	3,55 D
<i>Eucalyptus sp.</i>	5,48 aA	3,53 cB	3,48 cC	4,05 bB	4,14 B
Cumaru	3,61 bC	4,21 aA	3,97 aB	3,50 bD	3,82 C
Média	4,38 a	3,55 d	4,17 b	4,02 c	

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas para a temperatura e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas para a espécie não diferem significativamente entre si. Valores e letras em negrito representam a média geral. Todos a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Os valores mínimos e máximos da perda de massa foram de 2,82 a 6,03 %, respectivamente, independentemente da temperatura de tratamento térmico e das espécies.

Analisando o efeito isolado da temperatura de tratamento térmico, observa-se que a testemunha apresentou significativamente a maior perda de massa. Isto provavelmente tenha ocorrido porque as madeiras sem tratamento térmico são mais higroscópicas, por isso apresentaram maior quantidade de água para evaporar, quando comparadas às partículas tratadas termicamente.

Verifica-se que, nas temperaturas de 200 e 220 °C para os briquetes de *Eucalyptus grandis*, ocorreram valores elevados de perda de massa. Esses resultados podem ser atribuídos aos expressivos valores de matérias voláteis das partículas, conforme pode ser visto na Tabela 4.

Os valores médios da perda de massa para os briquetes de Bracatinga e *Eucalyptus sp.* não diferiram significativamente entre si. Entretanto, aqueles produzidos com partículas de *Eucalyptus grandis* tiveram significativamente a maior perda de massa (4,58 %) em relação às demais espécies. Essa variação nos resultados pode ser explicada pela umidade inicial das partículas das diferentes madeiras, pois em função dos tratamentos cada espécie se apresentava com uma umidade de trabalho (Tabela 3).

Os valores médios da perda de massa em função da pressão de compactação e das espécies são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Valores médios da perda de massa (%) dos briquetes em função da pressão de compactação e das espécies.

Espécies	Pressão (kgf/cm ²)			Média
	70,3	105,4	140,6	
<i>Eucalyptus grandis</i>	4,62 abA	4,70 aA	4,43 bA	4,58 A
Bracatinga	4,28 aB	3,83 bBC	4,08 aB	4,06 B
Peroba mica	3,72 aD	3,42 bD	3,51 abD	3,55 D
<i>Eucalyptus sp.</i>	4,16 abBC	4,00 bB	4,24 aAB	4,14 B
Cumaru	3,98 aC	3,68 bC	3,81 abC	3,82 C
Média	4,15 a	3,93 b	4,01 b	

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas para a pressão e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas para a espécie não diferem significativamente entre si. Valores e letras em negrito representam a média geral. Todos a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Os valores médios da perda de massa dos briquetes, independentemente da pressão de compactação e das espécies, variaram de 3,42 a 4,70 %.

Analisando o efeito isolado da pressão, observa-se que a maior perda de massa foi obtida na pressão de 70,3 kgf/cm². Isto pode ser explicado pela menor taxa de compactação e, conseqüentemente, maior quantidade de espaços vazios entre as partículas, evaporando a água mais facilmente. No entanto, nas pressões de 105,4 e 140,6 kgf/cm² não houve diferença significativa para a perda de massa.

Os maiores valores médios da perda de massa, independentemente da pressão, foram encontrados para a espécie *Eucalyptus grandis*. Por outro lado, os briquetes produzidos com as partículas de Peroba mica apresentaram os menores valores de perda de massa. Essa variação entre as espécies estudadas, provavelmente, está relacionada com a composição química de cada uma.

Rodrigues (2010), estudando briquetes de madeira e lodo biológico, também observou que a perda de massa ocorreu principalmente pela evaporação da água.

5.2.4 Absorção de água

A absorção de água dos briquetes interfere principalmente no seu transporte e armazenamento, uma vez que o alto teor de umidade acarreta

perda de resistência mecânica dos briquetes. Além disso, quanto maior a absorção de água menor será o poder calorífico útil dos briquetes.

Na Tabela 17 são apresentados os valores médios da absorção de água dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e da pressão de compactação, observando que os valores mínimos e máximos foram de 1,67 e 3,43 %, respectivamente.

Tabela 17 – Valores médios da absorção de água (%) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e da pressão de compactação.

Temperatura (°C)	Pressão (kgf/cm ²)			Média
	70,3	105,4	140,6	
Testemunha	2,96 aA	1,96 bB	3,08 aB	2,66 A
180	2,60 bB	2,25 cA	3,43 aA	2,76 A
200	2,47 bB	1,75 cBC	3,12 aB	2,45 B
220	2,15 bC	1,67 cC	3,12 aB	2,31 C
Média	2,55 b	1,91 c	3,19 a	

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas para a pressão e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas para a temperatura não diferem significativamente entre si. Valores e letras em negrito representam a média geral. Todos a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

De modo geral, houve redução da absorção de água dos briquetes com o aumento da pressão para 70,3 kgf/cm² nas diferentes temperaturas analisadas, no entanto, para a pressão de 140,6 kgf/cm², o percentual de água absorvida pelos briquetes aumentou. Isto não era esperado, pois maior compactação dificulta a absorção de água em função da menor área de contato com o meio e também pela maior plasticização da lignina, principalmente na parte mais externa do briquete.

Avaliando o efeito isolado da temperatura, observa-se que a absorção de água tendeu a se reduzir com o aumento da temperatura, o que já era esperado. O percentual de absorção de água foi significativamente menor na temperatura de 220 °C, o que mostra efeito positivo do tratamento térmico pela redução da higroscopicidade dos briquetes. Neste caso, as partículas tratadas tenderam a ser menos higroscópicas em função do número de hidroxilas disponíveis para fazer ligação com as moléculas de água, uma vez que no tratamento térmico os grupos hidroxílicos tendem a se aproximar e formar ligação de hidrogênio, liberando uma molécula de água.

Vale ressaltar que no tratamento térmico durante o aquecimento ocorre degradação dos polissacarídeos mais hidrofílicos da madeira (hemiceluloses), reduzindo o número de grupos OH hidrofílicos, onde normalmente se fixariam moléculas de água (RODRIGUES, 2009; PONCSAK et al., 2006).

Avaliando o efeito isolado da temperatura, verifica-se que os briquetes produzidos com partículas sem tratamento e os produzidos com partículas tratadas na temperatura de 180 °C foram significativamente mais higroscópicos que os demais.

Na Tabela 18 são apresentados os valores médios de absorção de água dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies, que variaram entre 1,45 e 3,65 %.

Tabela 18 – Valores médios de absorção de água (%) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies.

Espécies	Temperatura (°C)				Média
	Testemunha	180	200	220	
<i>Eucalyptus grandis</i>	3,65 aA	2,45 bC	1,97 cC	1,61 dD	2,42 C
Bracatinga	1,45 cD	2,81 aB	3,08 aA	2,34 bB	2,42 C
Peroba mica	2,74 bB	3,58 aA	2,71 bB	2,93 bA	2,99 A
<i>Eucalyptus sp.</i>	2,03 bC	2,61 aBC	2,56 aB	2,04 bC	2,31 C
Cumaru	3,44 aA	2,35 cC	1,93 dC	2,65 bA	2,59 B
Média	2,66 a	2,76 a	2,45 b	2,31 c	

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas para a temperatura e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas para a espécie não diferem significativamente entre si. Valores e letras em negrito representam a média geral. Todos a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

A absorção de água pelos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies não apresentou uma tendência definida, tendo apenas os briquetes produzidos com partículas de *Eucalyptus grandis* apresentado um comportamento esperado, ou seja, redução da higroscopicidade com o aumento da temperatura.

Essa variação nos resultados de absorção de água pode ser explicada, principalmente, pela composição química das diferentes espécies e pela dificuldade de obter um produto homogêneo através do tratamento térmico, conforme já relatado por outros pesquisadores a exemplo de Rousset (2009).

Avaliando o efeito das espécies na absorção de água dos briquetes, verifica-se que os menores valores médios foram encontrados para os

briquetes produzidos com as madeiras de *Eucalyptus sp.*, *Eucalyptus grandis* e Bracatinga, que não diferiram significativamente entre si.

Conforme Silva e Oliveira (2003), a madeira é um material higroscópico que sofre inchamento e retração de acordo com a umidade do ambiente, isto ocorre pela presença dos grupos hidroxilas livres. Com o tratamento térmico, ocorre uma redução dos grupos hidroxílicos disponíveis, reduzindo a higroscopicidade das partículas e, por sua vez, dos briquetes.

Na Tabela 19 são apresentados os valores médios de absorção de água dos briquetes em função da pressão de compactação e das espécies, que variaram entre 1,63 e 3,39 %.

Tabela 19 – Valores médios de absorção de água (%) dos briquetes em função da pressão de compactação e das espécies.

Espécies	Pressão (kgf/cm ²)			Média
	70,3	105,4	140,6	
<i>Eucalyptus grandis</i>	2,17 bC	1,88 cBC	3,21 aAB	2,42 C
Bracatinga	2,28 bC	1,66 cC	3,33 aAB	2,42 C
Peroba mica	3,28 aA	2,31 bA	3,39 aA	2,99 A
<i>Eucalyptus sp.</i>	2,19 bC	1,63 cC	3,10 aBC	2,31 C
Cumarú	2,81 aB	2,07 bAB	2,91 aC	2,59 B
Média	2,55 b	1,91 c	3,19 a	

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas para a pressão e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas para a espécie não diferem significativamente entre si. Valores e letras em negrito representam a média geral. Todos a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Avaliando o efeito da pressão de compactação dos briquetes das diferentes espécies, observa-se que os maiores valores médios de absorção de água foram encontrados para a pressão de 140,6 kgf/cm², o que não era esperado, pois com maior compactação ocorre menor quantidade de espaços vazios, em consequência, dificultando a absorção de água.

Os briquetes produzidos com a madeira de Peroba mica e Cumarú apresentaram os maiores valores médios de absorção de água, porém, diferiram significativamente entre si.

Segundo Rodrigues (2010), para produção de briquetes é importante conhecer os fatores que afetam o processo de compactação e as características da matéria-prima, como, por exemplo, sua afinidade com a água. Isto contribui para o entendimento de algumas propriedades dos briquetes, tais como a estabilidade dimensional e a resistência em função da

sua exposição às diferentes condições climáticas durante o transporte e armazenamento.

5.2.5 Umidade de Equilíbrio Higroscópico

O conhecimento da umidade de equilíbrio higroscópico dos briquetes é de grande importância, pois o baixo percentual de umidade favorece o transporte, ou seja, diminui os custos visto que a quantidade de energia por volume transportado é muito maior. Além disso, a baixa umidade de equilíbrio higroscópico confere aos briquetes seu formato compactado e, conseqüentemente, maior resistência física e mecânica.

Na Tabela 20 são apresentados os valores médios de umidade de equilíbrio higroscópico dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e da pressão de compactação.

Tabela 20 – Valores médios de umidade de equilíbrio higroscópico (%) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e da pressão de compactação.

Temperatura (°C)	Pressão (kgf/cm ²)			Média
	70,3	105,4	140,6	
Testemunha	10,89 bA	10,67 cA	11,31 aA	10,96 A
180	9,82 bBC	9,59 cB	10,58 aC	9,99 B
200	9,98 bB	9,33 cC	10,87 aB	10,06 B
220	9,78 bC	9,64 bB	10,53 aC	9,98 B
Média	10,12 b	9,81 c	10,82 a	

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas para a pressão e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas para a temperatura não diferem significativamente entre si. Valores e letras em negrito representam a média geral. Todos a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Os valores médios de umidade de equilíbrio higroscópico dos briquetes variaram de 9,33 a 11,31 %.

Observou-se que, independentemente da temperatura de tratamento térmico, o aumento da pressão de 70,3 kgf/cm² para 105,4 kgf/cm² ocasionou uma redução na umidade de equilíbrio higroscópico dos briquetes e quando a pressão de compactação se elevou para 140,6 kgf/cm² a umidade aumentou. Isto pode ser explicado pela heterogeneidade do material e por fragmentos de madeira que não foram completamente tratados, vista a dificuldade de homogeneização da madeira durante o processo. Isso mostra que o tempo em

que as madeiras ficaram expostas ao tratamento térmico não foi suficiente, uma vez que se trata de um processo de transferência de calor.

Analisando o efeito da temperatura de tratamento térmico, observa-se que os briquetes das partículas sem tratamento apresentaram significativamente os maiores valores de umidade de equilíbrio, quando comparados com os briquetes das partículas tratadas termicamente.

De acordo com Araújo (2010), a redução da higroscopicidade pode ser resultado de modificações químicas, principalmente da degradação parcial das hemiceluloses, quando ocorre uma diminuição dos grupos hidroxílicos. Além disso, segundo Poncsak et al. (2006), no tratamento térmico ocorre uma redução no número de grupos OH hidrofílicos, que são substituídos por grupos hidrofóbicos O-acetil.

Na Tabela 21 são apresentados os valores médios de umidade de equilíbrio higroscópico dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies.

Tabela 21 – Valores médios de umidade de equilíbrio higroscópico (%) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies.

Espécies	Temperatura (°C)				Média
	Testemunha	180	200	220	
<i>Eucalyptus grandis</i>	11,33 aB	10,27 dA	10,89 bA	10,61 cAB	10,77 A
Bracatinga	11,95 aA	10,21 cA	10,59 bB	10,36 bcB	10,78 A
Peroba mica	10,07 aC	10,11 aA	9,80 bC	9,64 bC	9,91 B
<i>Eucalyptus sp.</i>	11,47 aB	10,18 cA	10,63 bAB	10,72 bA	10,75 A
Cumarú	9,98 aC	9,20 bB	8,40 cD	8,58 cD	9,04 C
Média	10,96 a	9,99 b	10,06 b	9,98 b	

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas para a temperatura e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas para a espécie não diferem significativamente entre si. Valores e letras em negrito representam a média geral. Todos a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Os valores médios de umidade de equilíbrio higroscópico, independentemente da espécie e da temperatura de tratamento térmico, variaram entre 8,40 e 11,95 %.

Os briquetes produzidos com a madeira de Cumarú apresentaram os menores valores médios de umidade de equilíbrio, e essa redução expressiva da higroscopicidade provavelmente ocorreu devido à presença de extrativos na madeira.

De acordo com os estudos realizados por Jankowsky e Galvão (1979), as espécies com alto teor de extrativos apresentam maior estabilidade dimensional e umidade de equilíbrio mais baixa do que as espécies com pequenas quantidades de extrativos em sua composição. O autor considera que esses componentes ocupam uma parte do espaço da parede celular que normalmente seria ocupado pela água.

De modo geral, os briquetes produzidos com partículas sem tratamento térmico, independentemente da espécie, apresentaram maior umidade de equilíbrio higroscópico, mostrando que o tratamento térmico foi eficaz na redução da umidade. Assim, os resultados obtidos confirmam aqueles encontrados por Felfli (1999), que ressalva ter o caráter hidrofóbico dos briquetes tratados termicamente aumentado com o acréscimo da temperatura. O autor trabalhou com as temperaturas de 220, 250 e 270 °C e, em todos os casos, a umidade dos briquetes tratados não ultrapassou 10% em média.

Na Tabela 22 são apresentados os valores médios de umidade de equilíbrio higroscópico dos briquetes em função da pressão de compactação e das espécies.

Tabela 22 – Valores médios da umidade de equilíbrio higroscópico (%) dos briquetes em função da pressão de compactação e das espécies.

Espécies	Pressão (kgf/cm ²)			Média
	70,3	105,4	140,6	
<i>Eucalyptus grandis</i>	10,66 bA	10,21 cA	11,45 aA	10,77 A
Bracatinga	10,70 bA	10,29 cA	11,34 aA	10,78 A
Peroba mica	9,91 bB	9,57 cB	10,24 aB	9,91 B
<i>Eucalyptus sp.</i>	10,54 bA	10,36 bA	11,35 aA	10,75 A
Cumaru	8,76 bC	8,61 bC	9,74 aC	9,04 C
Média	10,12 b	9,81 c	10,82 a	

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas para a pressão e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas para a espécie não diferem significativamente entre si. Valores e letras em negrito representam a média geral. Todos a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Os valores médios de umidade de equilíbrio higroscópico dos briquetes variaram de 8,61 a 11,45 %.

De modo geral, observa-se que os briquetes produzidos com as diferentes espécies apresentaram comportamento semelhante para a umidade de equilíbrio, quando submetidas às pressões de compactação. Era esperado

que, com aumento da pressão na massa de partículas, ocorresse redução da umidade de equilíbrio pela diminuição dos espaços vazios.

Observa-se que, independentemente da espécie utilizada para a produção dos briquetes, ocorreu uma redução da umidade de equilíbrio higroscópico quando se aumentou a pressão de 70,3 para 105,4 kgf/cm², tendo havido posteriormente um acréscimo da umidade quando a pressão de compactação foi aumentada para 140,6 kgf/cm².

Os menores valores de umidade de equilíbrio foram obtidos para os briquetes produzidos com as partículas de Peroba mica e Cumaru, provavelmente por causa da quantidade de extrativos presentes nessas madeiras. Segundo Jankowsky e Galvão (1979), o teor de extrativos é um fator que interfere na higroscopicidade da madeira, e sua influência pode variar com a espécie.

Segundo Silva (2007), o teor de umidade do briquete deve estar dentro da faixa de 8 a 12 %. Alguns autores encontraram valores acima dessa faixa, como, por exemplo, Gentil (2008), que, trabalhando com briquete de serragem, encontrou valores de umidade variando entre 10,5 e 17,18 %. Já para os briquetes de casca de eucalipto utilizados no estudo de Vieira (2005), o valor médio para a mesma variável foi de 13,9%. Neste trabalho, independentemente da espécie, os briquetes produzidos apresentaram umidade dentro da faixa estabelecida para sua comercialização.

5.2.6 Densidade aparente

A densidade aparente dos briquetes é um parâmetro de extrema importância, pois define suas condições de estocagem, armazenamento e transporte. É uma propriedade física que afeta diretamente a densidade energética, ou seja, refere-se à quantidade de energia disponível por unidade de volume de briquetes.

Na Tabela 23 são apresentados os valores médios da densidade aparente dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e da pressão de compactação.

A análise de variância indicou que a densidade aparente dos briquetes foi afetada pelos tratamentos, ocorrendo interações significativas entre a

temperatura de tratamento térmico e a pressão de compactação. Houve também efeito isolado da temperatura e da pressão.

Tabela 23 – Valores médios da densidade aparente (g cm^{-3}) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e da pressão de compactação.

Temperatura (°C)	Pressão (kgf/cm^2)			Média
	70,3	105,4	140,6	
Testemunha	1,06 cC	1,10 bA	1,12 aA	1,09 C
180	1,11 aA	1,11 aA	1,12 aA	1,12 A
200	1,08 bB	1,11 aA	1,12 aA	1,10 B
220	1,10 bAB	1,09 bA	1,12 aA	1,10 B
Média	1,09 c	1,10 b	1,12 a	

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas para a pressão e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas para a temperatura não diferem significativamente entre si. Valores e letras em negrito representam a média geral. Todos a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Os valores mínimos e máximos da densidade aparente dos briquetes variaram entre 1,06 e 1,12 g cm^{-3} , respectivamente.

Observou-se uma tendência de a densidade aparente aumentar com a elevação da pressão, causada por uma maior compactação, ou seja, maior proximidade entre as partículas e, conseqüentemente, uma menor quantidade de espaços vazios, produzindo briquetes mais densos. Os valores de densidade foram análogos na pressão de 140,6 kgf/cm^2 , independentemente das temperaturas de tratamento térmico. Não houve também diferença significativa da densidade para os briquetes produzidos na pressão de 105,4 kgf/cm^2 nas diferentes temperaturas.

Analisando o efeito isolado da temperatura de tratamento térmico, observou-se que a densidade aparente foi maior para a temperatura de 180 °C, no entanto, para a testemunha, foi encontrado o menor valor médio de densidade (1,09 g cm^{-3}). Já os briquetes produzidos com as partículas tratadas na temperatura de 200 e 220 °C não diferiram significativamente entre si quanto à densidade (1,10 g cm^{-3}).

Em trabalho conduzido por Rodrigues (2010), os briquetes produzidos com finos de madeira de eucalipto apresentaram valor médio de densidade aparente igual a 1,10 g cm^{-3} , próximo ao obtido neste trabalho. Já Paula

(2010), pesquisando diferentes resíduos para a produção de briquetes, obteve para os briquetes de serragem valor de densidade equivalente a $0,90 \text{ g cm}^{-3}$.

Na Tabela 24 são apresentados os valores médios da densidade aparente dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies.

A análise de variância indicou que a densidade aparente dos briquetes foi afetada pelos tratamentos, ocorrendo interações significativas entre a temperatura e as diferentes espécies. Houve também efeito isolado da temperatura e das espécies.

Tabela 24 – Valores médios da densidade aparente (g cm^{-3}) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies.

Espécies	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)				Média
	Testemunha	180	200	220	
<i>Eucalyptus grandis</i>	1,07 bB	1,10 aB	1,05 bC	1,06 bC	1,07 D
Bracatinga	1,07 bB	1,10 aB	1,09 abB	1,09 abB	1,09 C
Peroba mica	1,07 bB	1,11 aB	1,11 aB	1,08 bBC	1,09 C
<i>Eucalyptus sp.</i>	1,12 bA	1,16 aA	1,16 aA	1,15 aA	1,15 A
Cumaru	1,12 abA	1,10 bB	1,10 bB	1,13 aA	1,12 B
Média	1,09 c	1,12 a	1,10 b	1,10 b	

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas para a temperatura e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas para as espécies não diferem significativamente entre si. Valores e letras em negrito representam a média geral. Todos a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Os valores mínimos e máximos da densidade aparente dos briquetes foram iguais a $1,05$ e $1,16 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente.

Avaliando o efeito da temperatura de tratamento térmico na densidade dos briquetes, observa-se que a testemunha apresentou, de modo geral, o menor valor médio.

Não houve diferença significativa entre a densidade dos briquetes das espécies na temperatura de $180 \text{ }^{\circ}\text{C}$, exceto para a madeira de *Eucalyptus sp.*, que apresentou os maiores valores. Isto se deve, provavelmente, à maior compactação das partículas em função das suas características geométricas.

Verificou-se, pelo efeito isolado das espécies, que os briquetes produzidos com as partículas de *Eucalyptus grandis* obtiveram o menor valor de densidade quando comparado às demais espécies. Já os briquetes de Bracatinga e Peroba mica não diferiram significativamente entre si. Essa

variação nos resultados se deve à densidade da madeira de origem, sendo que madeiras mais densas tendem a produzir briquetes de maior densidade para uma mesma pressão de compactação.

Os valores médios de densidade aparente dos briquetes observados neste trabalho foram maiores que os resultados encontrados por Paula (2010), que obteve valores variando entre 0,85 e 0,90 g cm⁻³ para os briquetes de resíduos madeireiros. No entanto, Gentil (2008), utilizando serragem para produção de briquetes com 85 mm e 95 mm de diâmetro, obteve valores médios iguais a 1,04 e 1,08 g cm⁻³, respectivamente.

A análise de variância indicou que a densidade aparente dos briquetes foi afetada pela pressão de compactação e pelas espécies. Além disso, houve interação significativa entre a pressão e as espécies.

Tabela 25 – Valores médios da densidade aparente (g cm⁻³) dos briquetes em função da pressão de compactação e das espécies.

Espécies	Pressão (kgf/cm ²)			Média
	70,3	105,4	140,6	
<i>Eucalyptus grandis</i>	1,06 bC	1,05 bD	1,10 aC	1,07 D
Bracatinga	1,08 aC	1,09 aC	1,10 aBC	1,09 C
Peroba mica	1,06 bC	1,10 aBC	1,12 aBC	1,09 C
<i>Eucalyptus sp.</i>	1,13 bA	1,15 abA	1,16 aA	1,15 A
Cumaru	1,10 aB	1,12 aB	1,12 aB	1,12 B
Média	1,09 c	1,10 b	1,12 a	

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas para a pressão e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas para as espécies não diferem significativamente entre si. Valores e letras em negrito representam a média geral. Todos a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Os valores médios da densidade aparente dos briquetes, independentemente da pressão de compactação e da espécie, variaram entre 1,05 e 1,16 g cm⁻³.

Verificou-se uma tendência de a densidade aparente aumentar com a elevação da pressão de compactação, tendo sido observados os maiores valores médios para os briquetes produzidos na pressão de 140,6 kgf/cm². Portanto, quanto maior a pressão de compactação, maior a proximidade entre as partículas e, conseqüentemente, menos espaços vazios, resultando em briquetes mais densos. Os briquetes fabricados com partículas de Bracatinga e

Cumaru, quando submetidos a diferentes pressões, não apresentaram diferença significativa para densidade.

Comparando as diferentes espécies, observou-se que a densidade foi significativamente maior para os briquetes produzidos com partículas de *Eucalyptus sp.*, entretanto, para a espécie *Eucalyptus grandis*, foi obtido o menor valor médio. Isto provavelmente ocorreu pelo efeito da densidade da madeira na densidade aparente dos briquetes, podendo, além disso, ter sido afetada pela geometria das partículas.

Furtado et al. (2010), trabalhando com diferentes matérias-primas sob pressões iguais a 65 bar, 95 bar e 130 bar, observaram que o aumento da pressão de compactação não afetou significativamente a densidade do briquete, o que não foi observado neste trabalho.

Sampaio et al. (2010) estudaram os parâmetros de produção de briquetes de *Eucalyptus sp.* e obtiveram valores de densidade aparente em função das pressões de 70,3; 105,4 e 140,6 kgf/cm² iguais a 1,11; 1,15 e 1,17 g cm⁻³, respectivamente, sendo esses valores próximos aos verificados na Tabela 25. Os resultados confirmam aqueles encontrados pela autora deste trabalho, que observou uma tendência de aumento da densidade com a elevação da pressão. Vale ressaltar que ambos os autores utilizaram o mesmo modelo de briquetadeira.

5.2.7 Densidade Energética

A densidade energética relaciona a quantidade de energia contida em um volume específico, sendo um parâmetro que avalia o potencial energético dos briquetes. É uma propriedade que está diretamente relacionada com a densidade dos briquetes e o poder calorífico das partículas.

Na Tabela 26 são apresentados os valores médios de densidade energética dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e da pressão de compactação, que variaram entre 5,09 e 5,65 Gcal m⁻³.

Tabela 26 – Valores médios de densidade energética (Gcal m^{-3}) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e da pressão de compactação.

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Pressão (kgf/cm^2)			Média
	70,3	105,4	140,6	
Testemunha	5,09 cB	5,29 bB	5,40 aC	5,26 C
180	5,46 aA	5,46 aA	5,51 aB	5,48 B
200	5,43 bA	5,55 aA	5,60 aAB	5,53 AB
220	5,53 bA	5,52 bA	5,65 aA	5,56 A
Média	5,38 c	5,45 b	5,54 a	

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas para a pressão e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas para a temperatura não diferem significativamente entre si. Valores e letras em negrito representam a média geral. Todos a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

De modo geral, a densidade energética dos briquetes aumentou com a elevação da pressão de compactação. Isto se deve, principalmente, à relação diretamente proporcional com a densidade dos briquetes, pois, conforme se pode observar, os maiores valores de densidade energética foram obtidos para os briquetes produzidos na pressão de $140,6 \text{ kgf/cm}^2$.

Avaliando o efeito da temperatura de tratamento térmico, observa-se que o maior valor médio da densidade energética foi obtido para os briquetes produzidos com as partículas tratadas a $220 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Verifica-se também que para essa mesma temperatura, foram encontrados os maiores valores de poder calorífico superior, o que contribui significativamente para aumentar a densidade energética.

Rodrigues (2009), estudando a madeira de *Eucalyptus grandis* sob três diferentes tratamentos térmicos, verificou para as madeiras sem tratamento e as tratadas termicamente a $220 \text{ }^{\circ}\text{C}$ apresentaram valores de densidade energética equivalentes a $3,97 \text{ Gcal m}^{-3}$ e $4,04 \text{ Gcal m}^{-3}$, respectivamente, tendo sido esses resultados inferiores aos registrados neste trabalho.

Na Tabela 27 são apresentados os valores médios de densidade energética dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies, que variaram entre $4,96$ e $5,93 \text{ Gcal m}^{-3}$.

Tabela 27 – Valores médios de densidade energética (Gcal m⁻³) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies.

Espécies	Temperatura (°C)				Média
	Testemunha	180	200	220	
<i>Eucalyptus grandis</i>	5,11 abC	5,17 aD	5,02 bD	5,19 aC	5,12 C
Bracatinga	5,01 bCD	5,29 aD	5,20 aC	5,23 aC	5,18 C
Peroba mica	5,48 cB	5,64 bB	5,76 abB	5,86 aA	5,69 A
<i>Eucalyptus sp.</i>	4,96 dD	5,79 bA	5,93 aA	5,63 cB	5,58 B
Cumarú	5,73 bA	5,49 cC	5,73 bB	5,91 aA	5,71 A
Média	5,26 c	5,48 b	5,53 ab	5,56 a	

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas para a temperatura e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas para a espécie não diferem significativamente entre si. Valores e letras em negrito representam a média geral. Todos a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

De modo geral, a densidade energética dos briquetes aumentou com a elevação da temperatura de tratamento térmico, o que já era esperado, pois este parâmetro está diretamente relacionado com o poder calorífico, que também apresentou tendência de aumento com a temperatura.

Os maiores valores de densidade energética dos briquetes foram observados para os briquetes produzidos com partículas de Peroba mica e Cumaru, que não diferiram significativamente entre si. Esses resultados foram afetados pela densidade dos briquetes e pelo poder calorífico, pois quanto maior os valores de ambas as propriedades maior o potencial energético dos briquetes.

Na Tabela 28 são apresentados os valores médios de densidade energética dos briquetes em função da pressão de compactação e das espécies, que variaram entre 5,04 e 5,82 Gcal m⁻³.

Tabela 28 – Valores médios de densidade energética (Gcal m⁻³) dos briquetes em função da pressão de compactação e das espécies.

Espécies	Pressão (kgf/cm ²)			Média
	70,3	105,4	140,6	
<i>Eucalyptus grandis</i>	5,07 bC	5,04 bD	5,25 aC	5,12 C
Bracatinga	5,14 aC	5,17 aC	5,23 aC	5,18 C
Peroba mica	5,51 bB	5,72 aA	5,82 aA	5,69 A
<i>Eucalyptus sp.</i>	5,51 bB	5,59 abB	5,64 aB	5,58 B
Cumarú	5,65 aA	5,75 aA	5,74 aAB	5,71 A
Média	5,38 c	5,45 b	5,54 a	

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas para a pressão e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas para a espécie não diferem significativamente entre si. Valores e letras em negrito representam a média geral. Todos a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

De modo geral, a densidade energética aumentou com a elevação da pressão de compactação, independentemente da espécie estudada. Isto se deve, principalmente, ao fator densidade, que também é afetado pela pressão.

Analisando o efeito da espécie na densidade energética, observa-se que os menores valores foram obtidos para os briquetes produzidos com as partículas de Bracatinga e *Eucalyptus grandis*, que não diferiram significativamente entre si.

Gentil (2008), estudando briquetes de serragem, encontrou para o parâmetro densidade energética valor equivalente a 3,753 Gcal m⁻³, resultado inferior ao obtido neste trabalho (Tabela 28).

5.2.8 Carga de ruptura

A carga de ruptura é um parâmetro que avalia os briquetes quanto ao seu manuseio, empilhamento, transporte e estocagem.

Na Tabela 29 são apresentados os valores médios da carga de ruptura dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e da pressão de compactação.

A carga de ruptura foi afetada pela temperatura de tratamento térmico e pela pressão, ocorrendo também interação significativa entre temperatura e pressão.

Tabela 29 – Valores médios da carga de ruptura (kgf) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e da pressão de compactação.

Temperatura (°C)	Pressão (kgf/cm ²)			Média
	70,3	105,4	140,6	
Testemunha	114,04 bC	122,53 abA	130,03 aA	122,20 C
180	130,58 abA	127,66 bA	139,07 aA	132,44 A
200	117,31 bBC	126,44 aA	129,71 aA	124,49 BC
220	124,38 aAB	126,18 aA	132,67 aA	127,74 AB
Média	121,58 b	125,70 b	132,87 a	

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas para a pressão e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas para a temperatura não diferem significativamente entre si. Valores e letras em negrito representam a média geral. Todos a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Os valores médios da carga de ruptura dos briquetes, independentemente da pressão e da temperatura, variaram entre 114,04 e 139,07 kgf.

De modo geral, a carga de ruptura aumentou com a elevação da pressão de compactação, independentemente das temperaturas de tratamento térmico. Isto já era esperado, pois essa propriedade está diretamente relacionada com a densidade aparente dos briquetes. Os maiores valores da carga de ruptura foram observados para a pressão de 140,6 kgf/cm². Esses resultados são explicados em função da maior compactação, promovendo assim menor ocorrência de espaços vazios e, conseqüentemente, maior carga de ruptura dos briquetes.

Observou-se que a carga de ruptura dos briquetes não diferiu significativamente nas pressões de 105,4 e 140,6 kgf/cm², independentemente da temperatura de tratamento térmico.

Analisando o efeito isolado da temperatura de tratamento térmico, verificou-se para a testemunha o menor valor médio da carga de ruptura, não diferindo significativamente dos briquetes produzidos na temperatura de 200 °C.

Paula (2010), estudando briquetes de diferentes resíduos, encontrou para os resíduos de madeira valor médio de carga de ruptura equivalente a 190,23 kgf, resultado superior ao obtido neste trabalho.

Na Tabela 30 são apresentados os valores médios da carga de ruptura dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies, que variaram entre 67,95 e 198,49 kgf.

Tabela 30 – Valores médios da carga de ruptura (kgf) dos briquetes em função da temperatura de tratamento térmico e das espécies.

Espécies	Temperatura (°C)				Média
	Testemunha	180	200	220	
<i>Eucalyptus grandis</i>	121,69 aB	111,25 abC	101,44 bC	102,15 bC	109,13 C
Bracatinga	67,95 bD	92,26 aD	91,21 aC	94,37 aC	86,45 D
Peroba mica	198,49 aA	194,45 aA	187,73 aA	196,01 aA	194,17 A
<i>Eucalyptus sp.</i>	123,01 bB	154,41 aB	148,52 aB	120,39 bB	136,58 B
Cumarú	99,86 bcC	109,81 bC	93,54 cC	125,78 aB	107,25 C
Média	122,20 c	132,44 a	124,49 bc	127,74 ab	

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas para a temperatura e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas para a espécie não diferem significativamente entre si. Valores e letras em negrito representam a média geral. Todos a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Os briquetes produzidos a partir das diferentes espécies apresentaram carga de ruptura distinta em função da temperatura de tratamento térmico. Para os briquetes de *Eucalyptus grandis*, a carga de ruptura reduziu com a elevação da temperatura, porém não houve diferença significativa nas temperaturas de 180, 200 e 220 °C. Os maiores valores da carga de ruptura foram obtidos para os briquetes produzidos com partículas de Peroba mica, no entanto, não houve efeito da temperatura de tratamento térmico.

Avaliando somente o efeito das espécies na carga de ruptura, observou-se que a maior carga de ruptura foi obtida para os briquetes de Peroba mica, diferindo significativamente das demais espécies. Já os briquetes de Bracatinga foram menos resistentes. Vale ressaltar que a densidade aparente média dos briquetes produzidos com as partículas destas duas espécies não diferiu entre si (Tabela 24). Isto se deveu provavelmente à geometria e ao arranjo das partículas no cilindro de compressão. Neste estudo, os briquetes das espécies *Eucalyptus grandis* e Cumarú não diferiram significativamente entre si quanto à carga de ruptura.

Na Tabela 31 são apresentados os valores médios da carga de ruptura dos briquetes em função da pressão de compactação e das espécies, que variaram entre 82,73 a 202,62 kgf.

Tabela 31 – Valores médios da carga de ruptura (kgf) dos briquetes em função da pressão de compactação e das espécies.

Espécies	Pressão (kgf/cm ²)			Média
	70,3	105,4	140,6	
<i>Eucalyptus grandis</i>	105,19 bC	102,15 bC	120,07 aC	109,13 C
Bracatinga	82,73 aD	84,67 aD	91,96 aE	86,45 D
Peroba mica	180,82 bA	199,07 aA	202,62 aA	194,17 A
<i>Eucalyptus sp.</i>	132,37 bB	134,40 abB	142,98 aB	136,58 B
Cumaru	106,79 aC	108,22 aC	106,74 aD	107,25 C
Média	121,58 b	125,70 b	132,87 a	

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas para a pressão e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas para a espécie não diferem significativamente entre si. Valores e letras em negrito representam a média geral. Todos a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Observa-se, de modo geral, que a carga de ruptura dos briquetes das espécies aumentou com a elevação da pressão de compactação. Estes resultados são provavelmente explicados em função da densidade dos briquetes, ou seja, quanto maior a pressão, maior a proximidade das partículas e das forças de aderência entre elas.

Verifica-se, para os briquetes produzidos com as partículas de Bracatinga e Cumaru, que a pressão de compactação não afetou de forma significativa a carga de ruptura.

Avaliando o efeito das espécies, observa-se maior carga de ruptura (194,17 kgf) para os briquetes fabricados com as partículas de Peroba mica, valor superior ao encontrado por Furtado et al. (2010), que estudaram o efeito do fator matéria-prima sobre a variável carga de ruptura e encontraram valores variando entre 115 e 192 kgf.

6. CONCLUSÕES

- As diferentes espécies apresentaram potencial para a produção de briquetes.
- O tratamento térmico da madeira, independentemente das espécies, de modo geral, aumentou o potencial energético das partículas e dos briquetes.
- A temperatura de tratamento térmico de 220 °C promoveu maiores ganhos energéticos para todas as espécies estudadas.
- O aumento da pressão de compactação eleva a densidade aparente e, conseqüentemente, aumenta a carga de ruptura dos briquetes.
- A pressão de compactação de 105,4 kgf/cm² produziu briquetes com propriedades desejáveis, além do menor dispêndio energético quando comparado à pressão de 140,6 kgf/cm².
- As diferentes espécies apresentaram comportamento distinto em cada propriedade avaliada em função da heterogeneidade das madeiras.
- O método de tratamento térmico utilizado neste estudo, de modo geral, não foi suficiente para garantir a homogeneidade do tratamento em toda a madeira, o que foi evidenciado pela variação dos resultados.
- Com base nos resultados obtidos, são propostos novos estudos para definir os parâmetros mais apropriados para o tratamento térmico, a fim de melhorar as características energéticas dos briquetes, principalmente em relação a temperaturas mais elevadas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF. Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. **Anuário estatístico da ABRAF - ano base 2010**. Brasília, 130p. 2011.

ANTUNES, R. C. **Briquetagem de Carvão Vegetal**. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC. Produção e Utilização de Carvão Vegetal. Belo Horizonte, 1982. Série de Publicações Técnicas nº8 p:197 – 206.

ARAÚJO, S.O. **Propriedades de madeiras termorretrificadas**. 2010. 93f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 8112: Carvão vegetal – análise imediata**. Rio de Janeiro. 1983.6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 8633: Carvão vegetal – determinação do poder calorífico**. Rio de Janeiro. 1984. 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 9484: Compensado - Determinação do teor de umidade**. Rio de Janeiro. 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **ABNT NBR ISO 11093-9 - Papel e cartão - Ensaio de tubetes-Determinação da resistência ao esmagamento**. Rio de Janeiro. 2009. 3p.

BARCELLOS, D.C. **Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo**. 2007. 140f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

BARCELLOS, D.C. COUTO, L.C.; MULLER, M.D.; COUTO, L. O estado da arte da qualidade da madeira de eucalipto para a produção de energia: um enfoque nos tratamentos silviculturais. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v.2, n.2, p.141-158, 2005.

BARRETO, E.J.F. **Tecnologias de energias renováveis: sistemas híbridos, pequenos aproveitamentos hidroelétricos, combustão e gasificação de biomassa sólida, biodiesel e óleo vegetal in natura**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008, 156 p.

BERGMAN, P.C.A.; BOERSMA, A.R.; KIEL, J.H.A.; PRINS, M.J.; PTASINSKI, K.J.; JANSSEN, F.J.J.G.. Torrefaction for entrained-flow gasification of biomass. Petten, Netherlands: ECN, 2005. 51p. Netherlands.

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.

BHATTACHARYA, S. C. Fuel for thought, renewable energy word. **Renewable Energy World**, Oxford, v. 7, n. 6, p. 122-130, 2004.

BRITO, J.O. Estudo preliminar de retificação térmica da madeira de eucalipto. In: Congresso Florestal Brasileiro, 7, **Anais...** Curitiba: SBS/SBEF, 1993. 774 p.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E. Aspectos técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis. In: Seminário de abastecimento energético industrial com recursos florestais, 2, 1982, São Paulo. **Anais ...** São Paulo, 1982. p. 101-137

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. **Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca**. Piracicaba: IPEF, n. 16, p. 63-70, 1978.

BROWNING, B.L. The chemistry of wood. 1963.

CARVALHO, E. A., BRINCK, V. Briquetagem, capítulo 15. Comunicação técnica elaborada para a 4ª edição do livro. In: LUZ, A. B. da, SAMPAIO, J. A., ALMEIDA, S. L. M. de. (CETEM – Centro de Tecnologia Mineral – Ministério da Ciência e Tecnologia). **Tratamentos de minérios**. Rio de Janeiro, 2004. p. 613-636.

CARVALHO, P.E.R. **Espécies Arbóreas Brasileiras**. Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2003.

CARVALHO, P.E.R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2008. v. 3, 593p.

CINTRA, T.C. **Avaliações energéticas de espécies florestais nativas plantadas na região do Médio Paranapanema, SP**. 2009. 84 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais - Tecnologia de Produtos Florestais), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

CLAUBERG, D. **Adubação N-P-K em *Mimosa scabrella* (Benth)**. 2005, 62 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2005.

CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.S.; AYARZA, J.A.C. Biomassa no Brasil e no mundo. In: **Tecnologias de Conversão Energética da Biomassa**. Manaus: EDUA/EFEI, 1997, p1-18.

DOAT J. **CTFT Research into wood pyrolysis**. Symposium Forest Products Research International Archivement and the Future, p 12-24. April 1985.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Florestas. **Manual técnico da bracatinga (*Mimosa scabrella* Bentham)**. Curitiba: EMBRAPA-CNPQ, (Série Documentos, n. 20), 70 p.1988.

ERIKSSON, S.; PRIOR, M. **The briquetting of agricultural wastes for fuel**, Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1990.

FABROWSKI, F.J. et al. Anatomia comparativa da madeira das variedades populares da Bracatinga (*Mimosa scabrella* Bentham). **Ciência Florestal**, v. 15, n. 1, p. 65-73, Santa Maria, 2005.

FARINHAQUE, R. **Influência da umidade no poder calorífico da madeira de Bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth), e aspectos gerais de combustão**. Curitiba: FUPEF, 1981. 13 p. (Série Técnica, 6)

FEITOSA NETTO, G.B.; OLIVEIRA, A.G.P.; COUTINHO, H.W.M.; NOGUEIRA, M.F.M.; RENDEIRO, G. Caracterização energética de biomassas amazônicas. In: AGRENER, 2006. Campinas-SP.

FELFLI, F. E. F. **Melhoramento das características energéticas de resíduos de biomassa através da torrefação**. 1999. 110 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) Campinas: Faculdade de Engenharia mecânica, UNICAMP, 1999.

FELFLI, F. E. F. **Torrefação de biomassa, viabilidade técnica e potencial de mercado**. 2003. 137 p. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) Campinas: Faculdade de Engenharia mecânica, UNICAMP, 2003.

FELFLI, F. F. et. al. Biomass briquetting and its perspectives in Brazil. **Biomass & Bioenergy**, v. 35, p. 236-242, 2011.

FELFLI, F. E. F.; LUENGO, C. A.; SOLER, P. B. Torrefação de Biomassa: Características, aplicações e perspectivas. In: Encontro de Energia no Meio Rural – AGRENER. 2003. Campinas-SP. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022000000200003&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 05 de maio 2011.

FIGUEROA, M.J.M.; MORAES, P.D. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.9, n. 4, p. 157-174, out. 2009.

FILIPPETTO, D. **Briquetagem de resíduos vegetais: viabilidade técnico-econômica e potencial de mercado**. 2008. 61 p. Dissertação (Mestrado em Planejamentos de sistemas energéticos), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

FREDERICO, P.G.U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 2009. 73 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2009.

FURTADO, T.S.; VALIN, M.; BRAND, M.A.; BELLOTE, A.F.J. Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 62, p. 101-106. mai/jul. 2010.

GENTIL, L. V. B. **Tecnologia e economia do briquete de madeira**. 2008. 156 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal – Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2008.

GONÇALVES, J.E. **Caracterização química e energética de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis***. 2006. 75f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu – SP. 2006.

GONÇALVES, J.E. **Avaliação energética e ambiental de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis***. 2010. 104 f. Tese (Doutorado em Agronomia - Energia na Agricultura) - Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu – SP. 2010.

JANKOWSKY, I. P.; CHIMELO, J. P.; CAVALCANTE, A. de A.; GALINA, I. C. M.; NAGAMURA, J. C. S. **Madeiras brasileiras**. Caxias do Sul: Spectrum, vol. 1, 1990. 172 p.

JANKOWSKY, I.P.; GALVÃO, A.P.M. Influência do teor de extrativos na umidade de equilíbrio da madeira. **IPEF**. n. 18, p. 1-33. jun.1979.

KALIYAN, K., MOREY, R. V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass & Bioenergy**. v. 33, n. 3, p. 337–359, USA, 2009.

LIMA, R.A. de; SILVA, H.D.da; LAVORANTI, O.J. Caracterização dendroenergética de árvores de *Eucalyptus benthamii*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 65, p. 09-17, jan/mar. 2011. Disponível em: <http://matas.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/192/200>. Acesso em: 01 Jul. 2011.

LIPPEL. Disponível em: <http://www.lippel.com.br/>. Acesso em: 02 maio de 2011.

LOGSDON, N.B.; FINGER, Z.; BORGES, C.G.A. Caracterização físico-mecânica da madeira de peroba-mica, *Aspidosperma populifolium* A. DC. (Apocynaceae). **Floresta**, Curitiba, PR, v. 38, n. 1, p. 11-21, jan./mar. 2008.

LORENZI, H. Árvores Brasileiras. **Manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 4. ed. São Paulo: Odessa/Instituto Plantarum, 2002. 368p. v. 1.

LOUREIRO, A.A. SILVA, M.F. da; ALENCAR, J.C. 1979. **Essências madeiras da Amazônia**. INPA, Manaus. 187 p

LOUREIRO, A.A. SILVA, M.F. da. 1968. **Catálogo das madeiras da Amazônia**. Belém: SUDAM, vol. 2, 411p.

MENDES, R.F. **Efeito do tratamento térmico sobre as propriedades de painéis OSB**. 2010. 115 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Produtos Florestais), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2010.

MORAIS, S. A. L. de, NASCIMENTO, E. A. do, MELO D. C. de. Análise da madeira de *Pinus oocarpa* parte I – estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. **Revista Árvore**. v. 29, n. 3, p. 461-470, 2004.

OLIVEIRA, J.T.; HELLMEISTER, J.C.; SIMÕES, J.W.; FILHO. M.T. Caracterização da madeira de sete espécies de eucaliptos para a construção civil: Avaliações dendrométricas das árvores. **Scientia Forestalis**, n. 56, p. 113-124, dez. 1999)

OLIVEIRA, R. M., **Utilização de técnicas de caracterização de superfícies em madeiras tratadas termicamente**. Tese de Doutorado. Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. 123p. 2009.

PAULA, L. E. R. **Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos**. 2010. 83 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia da Madeira) – Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras, Lavras.

PEREIRA, J.C.D.; STURION, J.A.; HIGA, A.R.; HIGA, R.C.V.; SHIMIZU, J.Y. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Colombo: *Embrapa Florestas*, 2000. 113p. (*Embrapa Florestas*. Documentos, 38).

PIRES, D.M. **Modelagem Fuzzy na estimativa do volume de árvores de *Eucalyptus sp.*** Monografia, 2007, 46 p., Lavras.

PINCELLI, A.L.P.S., BRITO, J.O., CORRENTE, J.E. **Avaliação da termorretificação sobre colagem na madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea var. hondurensis***. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, n.61, p.122-132, jun.2002.

PONCSÁK, S. et al. Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). **Wood Sci Technol**, v. 1, n. 40, p. 647–663, 2006. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/content/g225xlxr896u1422/fulltext.pdf>>. Acesso em: 20 de maio 2011.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos. **Biomassa & Energia**, Brasília, v. 1, n. 2, p. 173-182, 2004.

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

QUIRINO, W. F. **Briquetagem de resíduos ligno-celulosico**. Circular técnica do Laboratório de Produtos Florestais – LPF, v. 1, n. 2, p. 69-80, Brasília, 1991.

RIZZINI, C.T. **Árvores e madeiras úteis do Brasil: Manual de dendrologia brasileira**. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda. 1985. 296p.

RODRIGUES, T. O. **Efeitos da torrefação no condicionamento de biomassa para fins energéticos**. 2009. 71 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

RODRIGUES, V.A.J. **Valorização energética de lodo biológico da indústria de polpa celulósica através da briquetagem**. 2010. 117 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2010.

ROUSSET, P. L. A. A torrefação como condicionamento da biomassa para a gaseificação. In: Escola de Combustão, 2. São José dos Campos - SP, 2009. **Apresentação...** São José dos Campos, 2009, 71p.

SAMPAIO, J.R.;CARNEIRO, A.C.O.; JACOVINE, L.A.G; VILAS BOAS, M.A.; VITAL, B.R. Determinação dos parâmetros de produção de briquetes de *Eucalyptus sp.* In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 12, 2010, Lavras. **Anais...**Lavras: Indi Gráfica Editora Ltda, 2010.

SANTOS, R. C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de Eucalipto**. 2010. 159 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG, 2010.

SILVA, J. C., OLIVEIRA, J. T. S. Avaliação das propriedades higroscópicas da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. em diferentes condições de umidade relativa do ar. **Revista Árvore**. v.27, n.2, p. 233-239, mar./abr., 2003.

SILVA, J.C. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, de diferentes idades, visando à sua utilização na indústria moveleira**. 2002. 160f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SILVA, C. A. da. **Estudo técnico-econômico da compactação de resíduos madeireiros para fins energéticos**. 2007. 68 p. Dissertação (Mestrado em Planejamentos de Sistemas Energéticos) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

SOUZA, M. H. de; MAGLIANO, M. M.; CAMARGOS, J. A. A.; SOUZA, M. R. de. **Madeiras tropicais brasileiras**. Brasília, DF: IBAMA, Laboratório de Produtos Florestais, 1997. 152 p.

VALE, A.T.; BRASIL, M.AM.; LEÃO, A.L. Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 71-80, 2002.

VIEIRA, A.C. **Gaseificação de briquetes de casca de eucalipto**. 2005. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2005.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da Madeira**. Viçosa, MG: SIF, 1984. 21 p. (SIF, Boletim Técnico, 1).