

**PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DE BRIQUETES
DE RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS**

LUANA ELIS DE RAMOS E PAULA

2010

LUANA ELIS DE RAMOS E PAULA

**PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DE BRIQUETES DE RESÍDUOS
LIGNOCELULÓSICOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Processamento e Utilização da Madeira, para a obtenção do título de “Mestre”.

Orientador
Prof. Paulo Fernando Trugilho

LAVRAS
MINAS GERAIS –BRASIL
2010

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Paula, Luana Elis de Ramos e.

Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos /
Luana Elis de Ramos e Paula. – Lavras: UFLA, 2010.

72 p.: il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2010.

Orientador: Paulo Fernando Trugilho.

Bibliografia.

1. Energia. 2. Resíduos agroindustriais. 3. Biomassa. I.
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 662.65

LUANA ELIS DE RAMOS E PAULA

**PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DE BRIQUETES DE RESÍDUOS
LIGNOCELULÓSICOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Processamento e Utilização da Madeira, para a obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 22 de fevereiro de 2010

Profa. Maria Lúcia Bianchi

UFLA

Alfredo Napoli

CIRAD

Prof. Paulo Fernando Trugilho
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS –BRASIL

“Que eu jamais me esqueça que Deus me ama infinitamente,
que um pequeno grão de alegria e esperança dentro de cada um
é capaz de mudar e transformar qualquer coisa, pois...
a vida é construída de sonhos
e concretizada no amor!”

Chico Xavier

A Deus,
Ofereço

Aos meus pais, irmãos e ao Rapha,
Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, que me deu a vida, saúde e força para que eu chegasse onde estou.

Ao meu mentor espiritual, por sempre estar junto de mim e me ajudar nos momentos difíceis da vida.

Aos meus pais, João e Josefina, por sempre me darem amor incondicional, estarem presentes em todas as etapas de minha vida e por terem me apontado o caminho certo, amo muito vocês!

A Larissa, Marina e João, meus amados irmãos, pela amizade e companhia, vocês me ensinam muito e alegam minha vida.

Ao Raphael, por estar comigo e aliviar meu peso em mais uma caminhada, pelas horas de estudo, paciência, dedicação, carinho e amor.

À Universidade Federal de Lavras, em especial ao Programa de Ciência e Tecnologia da Madeira, pela oportunidade de cursar o mestrado.

A todos os funcionários do Departamento de Ciências Florestais e a todos os professores do Programa, pela amizade e ensinamentos.

Ao professor Paulo Trugilho, pela paciência, amizade, orientação e por ter sido presente em todas as etapas deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa de estudos.

Ao Waldir Quirino, pela atenção e presteza nos momentos de dúvidas na execução desta pesquisa.

Ao laboratorista Adalberto Ribeiro, por ter me auxiliado na realização da análise do teor de silício.

Ao professor Magno Antônio Patto Ramalho, ao “Toninho” da Cachaça Bocaina, ao Laboratório de Usinagem e à Unidade de Desdobro do DCF/UFLA

e ao Departamento de Agricultura, por fornecerem os resíduos utilizados neste estudo.

Aos colegas de curso e de trabalho, em especial Erica, Vanessa, Stela, Claudinéia, Marisa, Selma, Cris e Edy, pelo convívio, amizade e ajuda.

Às amigas Vássia, Poly, Luciana, Cris e Raquel, pelas risadas e passeios.

A Ana Elisa, por ter me ajudado a conduzir o experimento no laboratório.

Às amigas de república, Alessandra, Cris, Marina e Roberta, por todos os momentos e longas conversas.

Enfim, a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para esta conquista, e que, por distração, não foram citados, o meu OBRIGADA!

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	I
ABSTRACT GENERAL	II
CAPÍTULO 1: Caracterização de resíduos de biomassa vegetal para utilização energética	1
1 Resumo	1
2 Abstract	2
3 Introdução	3
4 Referencial teórico	5
4.1 Resíduo	5
4.2 Resíduos do processamento da madeira	6
4.3 Resíduos agrícolas	7
4.3.1 Arroz	7
4.3.2 Café	8
4.3.3 Cana-de-açúcar	8
4.4.4 Feijão	9
4.4.5 Milho	10
4.4.6 Soja	10
4.5 Utilização energética de resíduos de biomassa	10
5 Material e métodos	13
5.1 Análise elementar	13
5.2 Análise química	14
5.3 Teor de silício	15
5.4 Análise química imediata	15
5.5 Poder calorífico superior e inferior	15
5.6 Análise estatística	16
6 Resultados e discussão	17
6.1 Análise elementar dos resíduos	17
6.2 Análise química do material	20
6.3 Análise imediata e poder calorífico	23
6.4 Análise de correlação	27
7 Conclusão	30
8 Referências bibliográficas	31
CAPÍTULO 2: produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos	38
1 Resumo	38
2 Abstract	39
3 Introdução	40
4 Referencial teórico	42
4.1 Definição e composição de briquetes	42

4.2 Briquetagem.....	42
4.2.1 Equipamentos de briquetagem – briquetadeiras	44
4.2.1.1 Prensa briquetadeira de pistão	44
4.2.1.2 Prensa briquetadeira por extrusão.....	44
4.2.1.3 Prensa briquetadeira hidráulica.....	45
4.2.1.4 Prensa briquetadeira peletizadora	45
4.2.1.5 Prensa briquetadeira enfardadeira.....	45
4.3 Avaliação da qualidade dos briquetes.....	46
4.4 Vantagens e utilização dos briquetes	48
5 Material e métodos.....	49
5.1 Produção dos briquetes	49
5.2 Avaliação dos briquetes	50
5.2.1 Resistência mecânica e densidade	50
5.2.2 Ensaio de combustão	52
5.3 Ajuste do tempo de compactação	56
5.4. Ajuste da temperatura de briquetagem	58
5.5 Análise estatística	60
6 Resultados e discussão	61
7 Conclusão	69
8 Sugestões	70
9 Referências bibliográficas.....	71

RESUMO GERAL

PAULA, Luana Elis de Ramos e. **Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos**. 2010. 72p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.*

O Brasil é um dos maiores produtores de madeira e de produtos agrícolas do mundo. No entanto, em função da elevada produção, grande quantidade de resíduos é gerada e pode provocar sérios problemas ambientais, quando negligenciada e deixada indiscriminadamente na natureza. Uma alternativa para minimizar os impactos causados pelos resíduos é a sua utilização energética na forma de briquetes. Este trabalho foi realizado com os objetivos de: analisar diferentes resíduos de biomassa vegetal e da agroindústria, caracterizando-os como potenciais para a produção de energia, e produzir e avaliar briquetes feitos a partir destes resíduos. Para a realização deste trabalho, foram utilizados resíduos do processamento da madeira (serragem e maravalha); pergaminho do grão e caule do cafeeiro; caule e vagem do feijão; caule e vagem da soja; casca de arroz; folha, caule, palha e sabugo de milho e palha e bagaço da cana-de-açúcar. Os ensaios ocorreram no Laboratório de Energia da Biomassa Florestal da Universidade Federal de Lavras. Para a caracterização dos resíduos foram realizadas análise química, análise química imediata, análise de poder calorífico e análise elementar. A briquetagem foi realizada em briquetadeira da marca Lippel®, à pressão de 150 Bar (153 kgf/cm²). Determinou-se o melhor tempo de briquetagem para serragem da madeira e a melhor temperatura para arroz e pergaminho do café. Para avaliação da qualidade dos briquetes, determinaram-se a densidade relativa aparente, a resistência à compressão e o índice de combustão. De forma geral, todos os resíduos apresentaram potencial para serem utilizados na produção de energia. A casca de arroz apresentou o maior teor de lignina, característica interessante para a produção de energia, no entanto, seu alto valor de cinzas acarretou redução no poder calorífico e no carbono fixo. Os demais tipos de resíduos apresentaram características semelhantes e melhor desempenho, do ponto de vista energético. O tempo e a temperatura de briquetagem interferiram na resistência mecânica dos briquetes. O melhor tempo de prensagem foi de oito minutos para a serragem e a temperatura de melhor desempenho foi de 125°C para a casca do arroz e pergaminho do café. Os briquetes produzidos a partir da casca de arroz apresentaram maior densidade e alta resistência mecânica. O maior índice de combustão foi encontrado para os briquetes da vagem do feijão.

* Comitê Orientador: Paulo Fernando Trugilho – UFLA (Orientador), Alfredo Napoli – CIRAD e Maria Lúcia Bianchi – UFLA.

ABSTRACT GENERAL

PAULA, Luana Elis de Ramos e. **Production and evaluation of lignocellulosic residue briquettes**. 2010. 72p. Dissertation (Master in Wood Science and Technology) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.*

Brazil is one of the largest wood and agricultural product producers in the world. Nevertheless, concerning the elevated production, a great amount of residues is generated. These can cause serious environmental problems when overlooked and left indiscriminately in nature. One alternative to minimize the impacts caused by residues is their use for energy production as briquettes. The objectives of this work were: investigating different residues of plant and agroindustry biomass, characterizing them as potentials for energy production, and producing and evaluating briquettes made from these residues. For the fulfillment of this study were utilized wood processing residues (sawdust and shavings); coffee bean parchment and coffee plant stem; bean stem and pod; soybean stem and pod; rice husk, corn leaf, stem, straw and cob and straw and sugar cane bagasse. The assays occurred in the Forest Biomass Energy Laboratory of the Federal University of Lavras. For characterization of the residues were performed the following analyses: immediate chemical analysis, heating value and elementary analysis. Briquetting was performed in a briquetter of the Lippel® brand at pressure of 150 Bar (153 kgf/cm²). It was determined the best briquetting for wood sawing and the best temperature for rice and coffee parchment. For evaluation of the briquetter quality, the apparent relative density, compression resistance and Combustion Index were determined. In general, all the residues showed potential to be utilized in energy production. Rice husk presented the highest lignin content, an interesting feature for energy production; nevertheless, its high ash content brought about a reduction in heating value and fixed carbon. The other kinds of residues showed similar characteristics and best performance of the energy viewpoint. Both briquetting time and temperature interfered in the mechanical resistance of the briquettes. The best pressing time was of eight minutes for sawing and the temperature of best performance was of 125 °C for rice husk and coffee parchment. The briquettes produced from rice husk presented high density and mechanical resistance. The highest combustion index was found for the briquettes of bean pod.

* Guidance Committee: Paulo Fernando Trugilho (Major professor), Alfredo Napoli – CIRAD and Maria Lúcia Bianchi (UFLA).

CAPÍTULO 1

Caracterização de resíduos de biomassa vegetal para utilização energética

1 RESUMO

A utilização de resíduos vegetais para fins energéticos já é uma realidade, porém, para afirmar e indicar determinado material como bom gerador de energia, é necessário caracterizá-lo por meio de análises químicas e da determinação de seu valor calórico. Este trabalho foi realizado com o objetivo de analisar diferentes resíduos de biomassa vegetal e da agroindústria, caracterizando-os como potenciais para a produção de energia. Para a realização deste trabalho foram utilizados os seguintes resíduos: resíduos do processamento da madeira (serragem e maravalha); pergaminho do grão e caule do cafeeiro; caule e vagem do feijão; caule e vagem da soja; casca de arroz; folha, caule, palha e sabugo de milho e palha e bagaço da cana-de-açúcar. Para a caracterização dos resíduos, foram realizadas análise química, análise química imediata, análise do poder calorífico e análise elementar, todas conduzidas no Laboratório de Energia da Biomassa Florestal do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Lavras. De forma geral, todos os resíduos apresentaram potencial para serem utilizados na produção de energia. A casca de arroz apresentou o maior teor de lignina, característica interessante para a produção de energia, no entanto, seu alto valor de cinzas acarretou redução no poder calorífico e de carbono fixo. Os demais resíduos apresentaram características semelhantes, do ponto de vista energético, com destaque para o sabugo do milho, que apresentou maior poder calorífico, seguido do caule do café. Ambos continham também grande quantidade de carbono e carbono fixo.

2 ABSTRACT

The utilization of residues for energetic purposes is already a reality, but to state and indicate a certain material as a good generator of energy, it is necessary to characterize it through chemical analyses and of the determination of its heating value. This research aimed was to investigate different biomass and agroindustry residues, characterizing them as potentials for energy production. For accomplishment of this study were utilized the following residues: wood processing residues (sawdust and wood shavings), coffee bean parchment and coffee plant stem, bean stem and pod, soybean stem and pod, rice husk, corn leaf, stem, straw and cob and sugar cane straw and bagasse. For the characterization of the residues, the following analyses were performed: chemical analysis, immediate chemical analysis, heating value and elementary analysis. All the analyses were conducted in the Laboratório de Energia da Biomassa of the Departamento de Ciências Florestais of the Universidade Federal de Lavras. In general, all the residues presented potential to be utilized in energy production. Rice husk presented the highest content of lignin, characteristic interesting to energy production; nevertheless, its high value of ashes brought about a reduction in the heating value and fixed carbon. The other types of residues presented similar characteristics from the energetic standpoint, with emphasis on the cob of corn with the highest heating value, followed by the stem of the coffee, both also contained large amounts of carbon and fixed carbon.

3 INTRODUÇÃO

O Brasil é um grande produtor florestal e agrícola devido à sua extensa área para cultivo, à possibilidade de implantação de diferentes culturas, à posição no globo favorável à intensa radiação durante o ano, ao clima tropical, além de imensurável biodiversidade e alta tecnologia, o que o coloca em posição privilegiada no ramo das ciências agrárias.

Neste contexto, o país se tornou um dos maiores produtores de madeira e produtos agrícolas e é chamado por muitos de “celeiro do mundo”. No entanto, essa grande produção também gera grande quantidade de resíduos, os quais podem causar graves problemas ambientais.

De acordo com Vale & Gentil (2008), resíduo pode ser definido como todo material descartado nas atividades de um processo produtivo, podendo tornar-se um risco para o meio ambiente e, conseqüentemente, para a sociedade. Porém, eles podem deixar de ser um risco e passar a gerar lucro, transformando-se em matéria-prima para diversos outros processos, reduzindo o preço e a demanda do produto principal.

Segundo Quirino (2003), um resíduo lignocelulósico pode ser reciclado e reutilizado como matéria-prima em um processo diferente daquele de origem, como, por exemplo, ser transformado em partículas e constituir-se em painéis à base de madeira. Pode ser também utilizado energeticamente na produção de calor, de vapor ou de eletricidade em grupos geradores ou termelétricas.

A biomassa e seus resíduos são combustíveis sólidos que podem ser utilizados diretamente na condição em que se encontram, sob controle de umidade; podem ser transformados por processos mecânicos em partículas menores, como cavacos ou, mesmo, serragem ou, ainda, adensados na forma de briquetes (Vale & Gentil, 2008).

A utilização de resíduos de biomassa vegetal para fins energéticos já é uma realidade. Porém, para afirmar e indicar determinado material como bom gerador de energia, é necessário caracterizá-lo por meio de análises químicas e da determinação de seu valor calórico.

Diante do exposto, este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar diferentes resíduos de biomassa vegetal e da agroindústria, caracterizando-os como potenciais para a produção de energia.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Resíduo

Segundo Vale & Gentil (2008), o modelo energético brasileiro, inicialmente sustentado pela lenha, modificou-se ao longo das últimas décadas, atingindo, atualmente, 41,06% da oferta interna bruta de energia representada pelos combustíveis renováveis (biomassa e eletricidade). A participação dos resíduos no balanço energético nacional ainda é pequena, mas é significativo o crescimento ao longo dos últimos anos.

O termo “resíduo”, geralmente, é associado à ideia de “lixo”, porém, segundo Demajorovic (1995), resíduos sólidos diferenciam-se do termo lixo, pois este último não possui nenhum tipo de valor, referindo-se ao que deve ser descartado. Resíduos são aqueles que possuem valor econômico agregado, por possibilitarem seu reaproveitamento.

Quirino (2003) define resíduo de outra forma, sendo tudo aquilo que sobra de um processo de produção ou exploração, de transformação ou de utilização. É toda substância, material ou produto destinado, por seu proprietário, ao abandono. Este mesmo autor apresenta a seguinte classificação para os resíduos, definida pela Comunidade Europeia:

- resíduos urbanos ou também chamados de domésticos;
- resíduos industriais:
 - resíduo industrial banal: não possui aditivos tóxicos, como a madeira sem tratamento e materiais de origem vegetal em geral;
 - resíduo industrial especial:
 - . inerte: não libera nem reage com outro tipo de substância;
 - . último: sem possibilidades de transformação como as cinzas;
 - . tóxico ou perigoso: libera substâncias tóxicas durante o tratamento ou estocagem, como o resíduo nuclear.

Os resíduos vegetais, de forma geral, caracterizam-se por dimensões variadas. Geralmente, apresentam alta umidade, baixa densidade e grande volume; demandam grandes áreas de estocagem, além de serem dispersos geograficamente, o que dificulta sua coleta e transporte. Estes são alguns dos motivos que levam a uma subutilização dessa matéria-prima.

Resíduos lignocelulósicos são resíduos vegetais que, como o próprio nome diz, apresentam em sua constituição lignina e celulose, juntamente com outros componentes, como as hemiceluloses e os extrativos. Esses resíduos podem ser de culturas florestais, do processamento da madeira ou da madeira em uso, como postes, móveis, estacas, dormentes, páletes, moirões, etc.; além de resíduos de culturas agrícolas e palhas geradas em seu beneficiamento.

Os resíduos florestais são produzidos durante a exploração e posterior ao processamento da madeira. No caso da exploração florestal, os resíduos são deixados nas áreas exploradas sem nenhum aproveitamento e, muitas vezes, ocasionam problemas nos tratos culturais subsequentes. Em culturas agrícolas, o mesmo ocorre. Considerável volume de resíduos é deixado no local de colheita e, durante seu beneficiamento, grande quantidade de biomassa é descartada.

4.2 Resíduos do processamento da madeira

A madeira é um insumo importante que vem se valorizando ao longo das últimas décadas, em função da ampliação dos seus usos e da escassez nas regiões tradicionalmente consumidoras. A despeito desses fatores, a utilização integral da madeira ainda não é uma realidade (Ribeiro & Machado, 2005).

Segundo Lima & Silva (2005), todo processo de transformação da madeira gera resíduos em menor ou maior quantidade, sendo aproveitado somente 40% a 60% do volume total da tora.

A produção de madeira em tora de florestas plantadas para uso industrial no Brasil, segundo a Sociedade Brasileira de Silvicultura - SBS (2008), no ano

de 2007, foi de, aproximadamente, 152,6 milhões de m³. Houve um aumento de aproximadamente 0,8% em relação ao ano anterior, gerando, então, cerca de 76 milhões de m³ de resíduos.

Em alguns setores, de acordo com Santiago & Andrade (2005), o desperdício da madeira pode atingir dimensões maiores. Segundo estes autores, na utilização para fins energéticos, devido ao mau dimensionamento de equipamentos (fornalhas, fogões, fornos, etc.), ao despreparo dos operadores ou, ainda, à inexistência de meios eficazes que possibilitem o aproveitamento integral do material lenhoso, o desperdício pode chegar a 70% da massa original disponível.

4.3 Resíduos agrícolas

4.3.1 Arroz

O consumo do arroz pela população mundial é um hábito inquestionável e dificilmente sofrerá substituição (Souza et al., 2007).

No ano de 2009, a previsão para produção de arroz é de 12,6 milhões de toneladas, conforme dados da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) (2010). No ano de 2006, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2005), o Brasil produziu cerca de 11 milhões de toneladas de arroz não beneficiado, gerando 2,6 milhões de toneladas de casca de arroz. Segundo o Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas - SBRT (2007), durante o beneficiamento, a casca representa o maior volume e gera, em média, 22% de resíduo (em massa).

Exemplos para uso da casca do arroz são: combustão, gaseificação, adição ao cimento, produção de furfural e de papel (Amato, 2002).

A casca de arroz apresenta, em sua constituição química, grande quantidade de sílica que pode influenciar sua utilização. De acordo com Mehta

(1992), a casca de arroz é composta de, aproximadamente, 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica de base anidra.

4.3.2 Café

O Brasil é o maior produtor mundial de café, com safra estimada em 46 milhões de sacas, com destaque para Minas Gerais, responsável por 50% da produção (CONAB, 2009a).

Após a colheita, o beneficiamento do café pode ocorrer de duas formas: via seca ou via úmida. Segundo Vilela et al. (2001), no Brasil, a forma mais comum de beneficiamento do café ocorre por via seca, no qual o fruto do café é seco ao sol ou em pré-secadores e secadores artificiais, o que resulta em resíduos formados por casca e pergaminho, com rendimento de aproximadamente 50% do peso colhido. Carvalho (1992) e Rocha et al. (2006) também afirmam que a relação entre a obtenção do grão beneficiado e o resíduo pode atingir 1:1, ou seja, 50%.

A palha de café pode ser utilizada como fertilizante orgânico e como alimento na dieta de ruminantes (alto teor de nutrientes), como material bioissorvente (alto teor de carbono) e como fonte alternativa de energia devido ao seu alto poder calorífico, dentre outros (Moscardini Filho et al., 2009).

Giomo (2006) afirma que os resíduos de café são utilizados tanto para adubação dos cafezais como para queima em fornalhas, podendo, ainda, ser utilizados como briquete energético.

4.3.3 Cana-de-açúcar

Macedo (2001) afirma que, no Brasil, existem 308 usinas de açúcar e álcool, com processamento médio de 1 milhão de toneladas de cana por usina. Cada tonelada de cana (colmos) produz 140 kg (massa seca) de bagaço, dos quais 90% são utilizados para produzir energia térmica e elétrica na usina.

Adicionalmente, contém 150 kg de açúcares (usado na produção de açúcar, etanol e, agora, plásticos) e 140 kg (massa seca) de palha, que é perdida por meio de queimadas no campo.

De acordo com a CONAB (2009b), a safra 2009/10 de cana-de-açúcar foi de 612 milhões de toneladas. Segundo Correa Neto (2009), as expectativas apontam para um aumento da capacidade de produção e processamento de cana-de-açúcar, chegando a aproximadamente 715 milhões de toneladas por ano, em 2015, representando um crescimento de 65% em um período de 10 anos.

Um grande trabalho tem sido realizado no Brasil na busca de tecnologia para a colheita e transporte da palha, assim como para a avaliação da sua disponibilidade real. A legislação que restringe gradualmente a queima pré-colheita deverá atuar positivamente para que este resíduo seja incorporado ao sistema de geração de energia (Macedo, 2001).

4.4.4 Feijão

O Brasil é o maior produtor mundial de feijão e Minas Gerais destaca-se como um dos maiores estados produtores. O feijão é um dos mais importantes componentes da dieta alimentar do brasileiro, por ser reconhecidamente uma excelente fonte proteica (Abreu, 2005).

Conforme dados da CONAB (2010), a estimativa para produção de feijão das três safras do ano de 2009 é de 3,5 milhões de toneladas.

De acordo com Chagas et al. (2007), a produção, em massa seca, de grão de feijão por hectare é de 1.350 kg, de palhada da vagem é de 432 kg, de caule, 810 kg e de folha senescente, 1.032 kg. Logo, o resíduo gerado na cultura de feijão chega a 60% do total da colheita.

4.4.5 Milho

A produção de milho cresceu consideravelmente nos últimos anos. Em 1999, foi de 32 milhões de toneladas e, em 2008, quase dobrou, chegando a, aproximadamente, 58 milhões de toneladas (CONAB, 2010).

Como toda produção agrícola, a produção de milho gera grande quantidade de resíduos, os quais são deixados no campo e não são reaproveitados. Segundo Bose & Martins Filho (1984), a produção de folhas corresponde a 22% do peso dos grãos, a de palha da espiga a 14% e a de colmo, ou caule, atinge 42%. De acordo com os mesmos autores, durante o beneficiamento, o sabugo corresponde a 22% do peso do grão de milho.

Estima-se que 1.000 kg de milho em grão correspondam a 1.429 kg de milho em espiga, o que daria, para sabugo e palhas, um peso de 42,9%, em relação ao peso dos grãos (Centro de Estudos Agrícolas, 1991).

4.4.6 Soja

De acordo com IBGE (2006), na produção agrícola brasileira, a soja corresponde a 18% do total produzido, ficando à frente da cana-de-açúcar, do milho e, até mesmo, de café. Em 2009, a produção estimada pela CONAB (2010) foi de 67 milhões de toneladas.

A soja, por ser produzida em larga escala no país, gera, proporcionalmente, maior quantidade de resíduos. Segundo Bose & Martins Filho (1984), a palhada atinge de 120% a 150% do peso dos grãos. Os mesmos autores afirmam que a matéria seca da soja é composta de 26,87% de hastes, 41,33% de folhas e 31,78% de vagens.

4.5 Utilização energética de resíduos de biomassa

De acordo com Vale & Gentil (2008), a preocupação com a produção e o uso dos resíduos gerados pela utilização da biomassa, em particular a biomassa

vegetal, não pode ser deixada de lado. Os resíduos vegetais são descartados em forma de matéria orgânica ou queimados diretamente para a sua eliminação, o que acarreta um aumento considerável na poluição ambiental, além de representar perdas de matéria-prima e energia.

Uma alternativa para agregar valor e reduzir os impactos causados pelos resíduos é a sua utilização na produção de energia. A utilização energética desses resíduos apresenta grandes vantagens, como mudança na matriz energética, ampliação na geração de renda, diminuição dos gases de efeito estufa, diminuição dos volumes de resíduos depositados em aterros sanitários e, conseqüentemente, redução de custos (Quirino, 2003).

Na utilização dos resíduos vegetais para a geração de energia, é importante o conhecimento de algumas propriedades destes por meio da análise elementar, da análise química imediata e do poder calorífico. Pela análise elementar são determinados os teores de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre e cinzas, dos quais os elementos de maior contribuição para o poder calorífico são o carbono e o hidrogênio. A análise química imediata fornece os teores materiais voláteis, cinzas e, por diferença, o carbono fixo (Vale & Gentil, 2008). Na análise química, o desejável, para a produção energética, é que o material tenha grande quantidade de lignina e holocelulose e pequena quantidade de cinzas. Na análise química imediata, o ideal é um alto teor de carbono fixo e baixa umidade.

O poder calorífico é uma propriedade importante na avaliação de um combustível sólido e consiste na quantidade de calor liberadas na combustão completa de uma unidade de massa do material combustível, expressa em cal/g ou kcal/kg. O poder calorífico é chamado superior (PCS) quando a água proveniente da queima está presente em estado líquido (Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT, 1984). A partir do PCS, desconta-se a energia gasta

para evaporar o hidrogênio de constituição do combustível, na forma de água, e obtém-se o poder calorífico inferior (Nascimento, 2006).

5 MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho, foram utilizados resíduos lignocelulósicos adquiridos na cidade de Lavras, MG, sendo eles: resíduos do processamento da madeira (maravalha e serragem); pergaminho do grão e caule do cafeeiro; caule e vagem do feijão; caule e vagem da soja; casca de arroz; folha, caule, palha e sabugo de milho e palha e bagaço da cana-de-açúcar. Todos foram levados para o Laboratório de Energia da Biomassa Florestal da Universidade Federal de Lavras, onde foram analisados.

Inicialmente, alguns destes resíduos foram processados em moinho martelo, somente os de maior granulometria inicial e, em seguida, todos passaram por moinho de facas tipo Willey.

5.1 Análise elementar

Por meio da análise elementar determinou-se o teor de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e, por diferença, o teor de oxigênio do material.

Os resíduos foram peneirados e a alíquota utilizada foi a que passou pela peneira de 60 mesh. Após peneiramento, os resíduos foram secos em estufa convencional à temperatura de $(105\pm 2)^{\circ}\text{C}$.

Inicialmente, utilizando uma balança com precisão de 0,005 mg, pesaram-se, aproximadamente, 2 mg de resíduo em um porta-amostra de estanho. Em seguida, o conjunto (resíduo + porta amostra) foi depositado no carrossel do equipamento da marca Elemental[®], ilustrado na Figura 1. A análise foi realizada em uma amostra por vez. Os gases necessários para a operação foram o hélio, que é o gás de arraste, e o oxigênio, gás de ignição. A temperatura do tubo de combustão, localizado no interior do equipamento, no momento da queda da amostra do carrossel, foi de 1.150°C . Após a combustão, os gases foram transportados por arraste para o tubo de redução e dele seguiram para a

coluna de detecção. Os elementos foram determinados por meio de um detector de term condutividade, em que cada elemento fez sua interação e teve seu pico específico. O computador que estava acoplado ao equipamento fez o cálculo dessa integração e obtiveram-se os valores dos elementos em porcentagem.

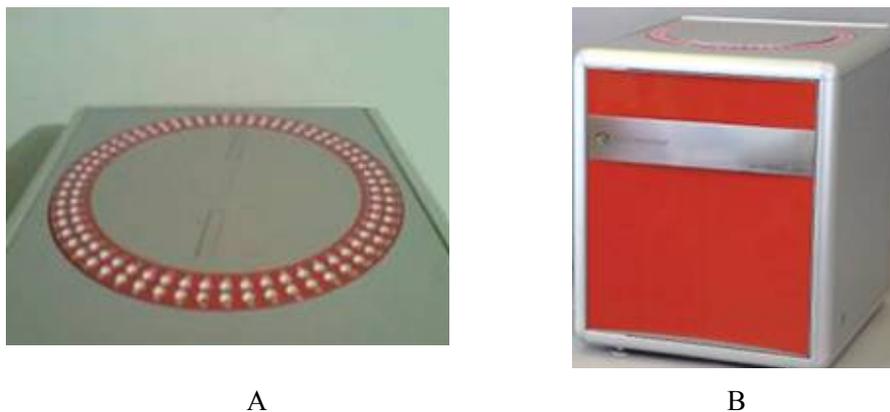


FIGURA 1 Analisador Elementar, (A) Carrossel - Vista superior; (B) Aparelho.

5.2 Análise química

Para a caracterização química por meio da análise de extrativos totais, lignina e cinzas, o material foi classificado em peneiras sobrepostas, sendo utilizada a alíquota que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retida na de 60 mesh.

Após este processo, os resíduos foram acondicionados em câmara climática por, aproximadamente, 30 dias, sob temperatura de $(20\pm 3)^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $(65\pm 2)\%$ para homogeneização da umidade.

Para as análises químicas foram utilizadas as Normas M3/89 na determinação do teor de extrativos, M11/77 para cinzas e M70/71 para lignina, da Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel (ABTCP) (1974).

O teor de holocelulose (H) foi determinado pela análise somativa, a qual considerou a Equação 1, utilizando-se a percentagem em relação à massa seca dos componentes.

$$H(\%) = 100 - ET(\%) - LI(\%) - CI(\%) \quad (1)$$

em que

ET = extrativos totais

LI = lignina

CI = cinzas

5.3 Teor de silício

A determinação do teor de silício foi realizada na casca de arroz por meio do método colorimétrico do “azul de molibdênio”, segundo Furlani & Gallo (1978).

5.4 Análise química imediata

A análise química imediata foi realizada conforme a Norma 8112 da ABNT (1983). Por meio desta análise determinou-se o teor de materiais voláteis, cinzas e, por diferença, o teor de carbono fixo do material.

Para a realização desta análise, foi utilizado o material com a mesma granulometria da análise química.

5.5 Poder calorífico superior e inferior

Para a determinação do poder calorífico superior, os resíduos foram peneirados e a alíquota utilizada foi a que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retida na de 60 mesh. Em seguida, o material foi seco em estufa, à temperatura de $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$.

A análise do poder calorífico superior foi realizada em um calorímetro da marca Parr® (Figura 2), conforme a Norma 8633 da ABNT (1984).



A B C
FIGURA 2 (A) (B) Bomba calorimétrica; (C) calorímetro.

O poder calorífico inferior (PCI) foi determinado conforme a Equação 2:

$$PCI = PCS - 5,72 * (9H + U) \quad (2)$$

em que

PCS = Poder calorífico superior (cal/g)

H = hidrogênio (%)

U = umidade (%)

5.6 Análise estatística

Foi utilizada uma análise de correlação para se verificar a associação entre as características analisadas nos resíduos.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Análise elementar dos resíduos

Na Tabela 1 são apresentados os resultados obtidos na análise elementar dos resíduos avaliados.

TABELA 1 Análise elementar dos resíduos avaliados.

Material		Elementos (%)						
		C	H	N	S	O	C/H	C/N
Arroz	Casca do grão	39,1	5,8	0,3	0,1	54,7	6,7	130,3
Cafê	Caule	48,6	6,8	0,5	0,1	44,0	7,2	97,0
	Pergaminho	47,2	6,9	0,5	0,2	45,1	6,8	94,4
Cana	Bagaço	45,3	6,8	0,5	0,3	47,1	6,7	90,6
	Palha	44,6	6,6	0,3	0,4	48,1	6,8	148,7
Feijão	Caule	44,3	6,6	0,7	0,3	48,1	6,7	63,3
	Vagem	41,8	6,5	0,9	0,3	50,5	6,4	46,4
Madeira	Serragem	48,2	6,5	0,1	0,2	45,1	7,4	482,0
	Maravalha	47,3	6,6	0,1	0,2	45,8	7,2	473,0
Milho	Caule	45,6	6,5	0,9	0,3	46,8	7,0	50,7
	Folha	45,4	6,8	0,9	0,3	46,5	6,7	50,4
	Palha	44,8	6,8	0,3	0,1	47,9	6,6	149,3
	Sabugo	45,5	6,7	0,5	0,3	47,0	6,8	91,0
Soja	Caule	45,7	6,6	0,6	0,1	47,0	6,9	76,2
	Casca vagem	42,5	6,5	1,6	0,3	49,0	6,5	26,6

Observando-se os resultados apresentados na Tabela 1 verifica-se que o teor de enxofre para todos os resíduos foi baixo, variando de 0,1% a 0,4%. A

presença de enxofre em combustíveis é indesejável, devido a problemas de corrosão e liberação de SO₂ (gás) após combustão.

Os valores de referência para a análise elementar de alguns resíduos são apresentados na Tabela 2.

TABELA 2 Valores de referência para a análise elementar.

Material		Análise elementar (%)					Referência
		C	H	N	S	O	
Arroz	Casca	40,96	4,30	0,40	0,02	-	Jenkins (1990)
Café	Pergaminho	44,00	5,40	0,70	-	49,90	Brum et al. (2006)
Cana	Bagaço	46,70	5,90	0,90	-	46,50	Seye et al. (2003)
	Palha	43,42	5,71	1,23	-	49,64	
Feijão	Palha	41,50	5,90	0,60	-	52,00	Oliveira (2009)
Madeira	Resíduo	48,06	6,03	0,70	-	45,21	Seye et al. (2003)
Milho	Caule + folha	41,90	5,30	0,00	-	46,00	Raveendran et al. (1995)
	Sabugo	47,60	5,00	0,00	-	44,60	
	Palha	45,80	4,50	0,75	-	48,90	Bianchi (1995)

Os resultados encontrados para a casca de arroz apresentaram o maior teor de oxigênio e os menores de carbono e hidrogênio. Os valores da análise elementar da casca de arroz estão de acordo com Jenkins (1990).

A análise elementar do caule do café foi semelhante à dos resíduos de madeira. Os valores encontrados para a análise do pergaminho do café estão de acordo com os relatados por Brum et al. (2006).

O bagaço e a palha da cana apresentaram percentagens de elementos semelhantes ao encontrado por Seye et al. (2003).

A análise elementar da palha do feijão (caule + vagem), realizada por Oliveira (2009), resultou em valores similares aos deste trabalho para caule e vagem do feijão. Seye et al. (2003), estudando resíduos de madeira, encontraram, na análise elementar, resultados compatíveis aos encontrados para maravalha e serragem neste estudo.

Obernberger et al. (2006) afirma que o teor de carbono em combustíveis de madeira é superior ao de herbáceas, o que também foi observado no presente trabalho.

Os resultados da análise elementar apresentada na Tabela 1 mostram que as percentagens de elementos presentes no caule e na folha do milho estão de acordo com os demonstrados por Raveendran et al. (1995) (Tabela 2), que estudaram o pé de milho (caule + folha). Os mesmos autores, estudando o sabugo, encontraram valores semelhantes ao deste estudo. Os resultados encontrados para a palha do milho foram semelhantes aos determinados por Bianchi (1995).

A relação C/H está apresentada na Tabela 1. O maior valor de C/H encontrado foi para a serragem da madeira e o menor para a vagem do feijão. Quanto maior esta relação melhor para a produção de energia, pois, segundo Warhurs et al. (1997), o aumento na relação C/H indica um aumento no grau de aromaticidade do material.

Na Tabela 1 se encontra a relação C/N. O maior valor para esta relação foi determinado para a serragem, seguida da maravalha, ambas resíduos de madeira. Segundo Munalula & Meincken (2009), o maior teor de nitrogênio está relacionado aos impactos ambientais e poluição do ar, em função da formação de óxidos de nitrogênio tóxicos e ácido nítrico.

6.2 Análise química do material

Na Tabela 3, estão apresentados valores médios para o teor de extrativos totais, lignina, cinzas e holocelulose dos resíduos avaliados. Os valores de referências encontrados para estas análises estão apresentados na Tabela 4.

TABELA 3 Análise química dos resíduos avaliados.

Material		Extrativos (%)	Lignina (%)	Cinzas (%)	Holocelulose (%)
Arroz	Casca do grão	4,06	26,90*	16,43	52,61
Café	Caule	10,49	22,88	1,12	65,51
	Pergaminho	7,63	23,04	1,46	67,87
Cana	Bagaço	31,76	20,88	0,80	46,56
	Palha	9,18	20,85	4,32	65,65
Feijão	Caule	7,55	21,61	4,61	66,23
	Vagem	18,19	11,99	6,65	63,17
Madeira	Serragem	9,37	21,88	0,18	68,57
	Maravalha	5,60	20,62	0,13	73,65
Milho	Caule	11,31	20,49	3,43	64,77
	Folha	10,51	19,26	3,53	66,70
	Palha	5,85	9,29	1,58	83,28
	Sabugo	5,85	15,75	1,16	77,24
Soja	Caule	6,87	21,64	2,28	69,21
	Vagem	21,77	17,16	7,25	53,82

* Valor ajustado, subtraído 8,32% de silício.

TABELA 4 Valores de referências para análise química dos resíduos.

Material	Análise química (%)				Referência	
	Ext.	Lig.	Cin.	Hol.		
Arroz	Casca do grão	-	29,40	8,50	-	Reyes et al. (1997)
	Caule	-	-	0,68	-	Pereira (2008)
Café		7,00	20,00	1,37	76,00	Brum (2007)
	Pergaminho	-	24,50	0,50	66,20	Brahan & Bressani (1978)
Cana	Bagaço	6,80	30,00	2,40	-	Pitarelo (2007)
		-	19,25	-	-	Marabezi et al. (2009)
	Palha	11,5	39,70	11,70	-	Pitarelo (2007)
		-	19,10	-	-	Marabezi et al. (2009)
Feijão	Vagem+Palha	22,7	8,40	-	71,70	Brum et al. (2006)
		-	-	4,30	-	Oliveira (2009)
Madeira	<i>E. grandis</i>	6,71	31,77	0,17	61,52	Trugilho et al. (2003)
	<i>E. saligna</i>					
	<i>E. urophylla</i>	9,15	26,70	0,16	63,62	Mori et al. (2002)
Milho	Folha	-	12,60	-	72,00	Cruz et al. (2000)
	Sabugo	-	20,30	-	66,40	
	Palha	-	8,79	1,52	57,49	Salazar et al. (2005)
Soja	Vagem	-	-	8,90	-	Silva et al. (2008)

Ext., Lig., Cin., Hol. = Teor de extrativos, lignina, cinzas e holocelulose.

Pode-se observar, pelos dados da Tabela 3, que a casca do grão de arroz apresentou menor valor de extrativos e maior de cinzas, comparada aos demais resíduos. O alto teor de cinzas neste resíduo deve-se à sua grande quantidade de sílica (SiO₂). O teor de silício encontrado foi de 8,32% na casca de arroz. Segundo Della et al. (2006), a casca tem em torno de 14% de sílica e, do total de cinzas, cerca de 72% é de sílica.

Reyes et al. (1997) encontraram teor de lignina para casca de arroz semelhante ao deste trabalho, o que não ocorreu para as cinzas. Segundo Della et al. (2006), a composição química da casca de arroz varia em função do solo em que é plantado, dos tipos e dos teores de fertilizantes utilizados, das condições climáticas, bem como do tipo de arroz propriamente dito.

A casca de arroz apresentou ainda baixo teor de holocelulose, o que está associado ao seu alto teor de cinzas.

O resultado obtido para as cinzas do caule do cafeeiro está próximo ao obtido por Pereira (2008), como se observa na Tabela 4. Para o pergaminho do café, os valores deste estudo estão semelhantes aos encontrados por Brahan & Bressani (1978) e Brum (2007).

O material que apresentou o maior valor médio de extrativos foi o bagaço de cana, próximo de 32%, diferente do relatado por Pitarelo (2007). Os resultados encontrados por este autor diferiram dos deste trabalho provavelmente porque o bagaço utilizado por ele passou por queima e lavagem antes de ser moído. Marabezi et al. (2009) encontraram percentagem de lignina similar à encontrada neste trabalho.

Os resultados para análise química da palha da cana diferiram dos encontrados por Pitarelo (2007), com exceção para o teor de extrativos. O teor de lignina está de acordo com os de Marabezi et al. (2009).

As análises químicas dos resíduos do feijão mostraram que o caule e a vagem contêm percentagens diferentes de componentes; a maior diferença foi observada no teor de extrativos e lignina. Na Tabela 4 verifica-se que estudos já realizados consideram a análise da palha (caule + vagem) como um todo.

Para a análise química da maravalha e da serragem não se observou diferença significativa, o que já era esperado, uma vez que, apesar de resíduos, ambos são madeira. Mori et al. (2002) e Trugilho et al. (2003), estudando a

madeira de *Eucalyptus*, encontraram valores similares aos determinados neste trabalho.

A análise química do caule e da folha do milho apresentou resultados semelhantes, assim como a palha e o sabugo, com exceção do teor de lignina para estes últimos. As percentagens de componentes dos resíduos do milho estão de acordo com Cruz et al. (2000) e Salazar et al. (2005), com exceção da holocelulose da palha do milho.

A vagem e o caule da soja apresentaram resultados diferenciados na análise química. A vagem apresentou alta quantidade de extrativos e cinzas, baixo teor de holocelulose e teor de lignina intermediário, quando comparada à madeira. Silva et al. (2008) encontraram valor de cinzas para a vagem da soja próximo ao determinado neste estudo. Os números encontrados para soja não foram muito distintos dos encontrados para o feijão, o que era esperado, uma vez que ambos são leguminosas.

6.3 Análise imediata e poder calorífico

Os resultados encontrados na análise imediata e poder calorífico superior dos resíduos estudados estão apresentados na Tabela 5.

TABELA 5 Análise imediata e poder calorífico dos resíduos avaliados.

Material		Análise imediata (%)		Poder calorífico (cal/g)	
		Materiais voláteis	Carbono fixo	Superior	Inferior
Arroz	Casca do grão	66,36	17,30	3812,30	3445,08
Café	Caule	80,39	19,33	4544,00	4125,30
	Pergaminho	79,14	19,90	4441,74	4017,89
Cana	Bagaço	82,31	17,16	4274,48	3855,78
	Palha	78,64	17,46	4315,66	3907,25
Feijão	Caule	77,53	18,75	4488,74	4080,33
	Vagem	76,65	18,10	4218,53	3815,27
Madeira	Maravalha	83,19	16,66	4291,71	3888,45
	Serragem	78,89	21,03	4435,04	4026,63
Milho	Caule	76,82	20,47	4211,88	3808,62
	Folha	78,30	18,43	4464,52	4045,82
	Palha	81,68	17,05	4443,38	4024,68
	Sabugo	81,31	18,32	4615,26	4201,70
Soja	Caule	80,59	18,06	4504,25	4095,84
	Vagem	76,61	18,24	4028,54	3625,28

Na Tabela 6 observam-se valores de referência para análise imediata e poder calorífico dos resíduos.

Os valores encontrados para a análise imediata e poder calorífico da casca de arroz (Tabela 5) estão de acordo com Jenkins (1990), Diniz et al. (2004) e Souza et al. (2005) e são apresentados na Tabela 6. A casca de arroz contém grande quantidade de cinzas comparada aos demais resíduos, o que, possivelmente, provocou redução de seu poder calorífico.

TABELA 6 Valores de referência para análise imediata e poder calorífico superior dos resíduos.

Material	Análise imediata		PCal (cal/g)	Referência	
	MV (%)	CF (%)			
Arroz	Casca	64,30	11,90	-	Souza et al. (2005)
		65,47	16,67	3852,00	Jenkins (1990)
		-	-	3908,00	Diniz et al. (2004)
Cana	Bagaço	73,78	14,95	4139,00	Jenkins (1990)
		69,39	16,10	-	Seye (2003)
	Palha	66,40	16,35	-	
Madeira	<i>Eucalyptus</i>	74,10	9,60	-	Brito & Barrichello (1978)
		a	a	-	
	Madeira seca	-	-	4000 a 4800	Brito (1993)
Milho	Caule + folha	80,10	13,10	3956,94	Raveendran et al. (1995)
	Sabugo	85,40	11,80	3744,02	Jenkins (1990)
		80,10	18,54	4498,00	
	Palha	-	-	3730,00	Quirino et al. (2005)
Soja	Vagem	63,50	27,70	-	Silva et al. (2008)

Os resultados encontrados para a análise imediata do caule e do pergaminho do café foram próximos, fato observado também para o teor de lignina apresentado na Tabela 3. A análise imediata dos resíduos do café apresentou resultado semelhante ao da madeira.

Os valores determinados neste estudo para bagaço de cana estão em conformidade com Jenkins (1990) e Seye (2003), com exceção do teor de materiais voláteis.

A palha da cana apresentou valores de carbono fixo e poder calorífico semelhantes aos do bagaço, o que era esperado, uma vez que ambos contêm teores de lignina próximos. Seye (2003) encontrou valores similares para

carbono fixo dos dois resíduos, porém, os resultados foram inferiores aos observados neste trabalho.

Os resultados da análise imediata para os resíduos do feijão, caule e vagem apresentaram valores de materiais voláteis e carbono fixo similares. O poder calorífico superior do caule foi ligeiramente superior, provavelmente porque este apresentou maior teor de lignina.

Apesar de a análise imediata e o poder calorífico superior da maravalha e da serragem terem apresentado resultados distintos, ambos se encaixam nos intervalos determinados por Brito & Barrichello (1978) e Brito (1993).

Observando-se os dados da Tabela 5 verifica-se que os resultados encontrados para análise imediata do caule e da folha do milho foram semelhantes, assim como os da palha e do sabugo.

Raveendran et al. (1995) encontraram teor de materiais voláteis para o pé de milho (folha + caule) similar ao do caule e da folha do presente trabalho. Para o sabugo, os autores obtiveram teor de materiais voláteis semelhante ao determinado neste estudo, o que não ocorreu para cinzas e poder calorífico superior. A análise química imediata e o poder calorífico do sabugo estão de acordo com Jenkins (1990). Quirino et al. (2005) encontraram um valor para poder calorífico inferior ao observado neste estudo, na palha do milho.

Os resíduos da soja apresentaram resultados próximos aos do feijão. Silva et al. (2008) obtiveram teor de carbono fixo para a vagem da soja superior ao deste estudo.

O poder calorífico inferior está dentro do esperado para materiais lignocelulósicos. O maior valor encontrado foi para o sabugo do milho e o menor para a casca do arroz.

Analisando os resultados encontrados para as análises dos resíduos verifica-se, na maioria dos casos, diferença destes comparados aos encontrados na literatura. Segundo Brum (2007), deve-se levar em conta que a constituição

química desses materiais depende de vários fatores, como constituição do solo, clima, época da colheita, infecções e pragas, método de plantio, entre outros, fazendo com que mesmo plantas de mesma espécie apresentem composições diferentes. Podem ocorrer também diferenças na forma de amostrar o material e na própria metodologia de realização da análise. Além disso, trata-se de resíduo, material que é resultado de um processo e que pode ter sido contaminado ou armazenado em locais inadequados.

6.4 Análise de correlação

Os mais significativos coeficientes de correlação para as características avaliadas nos resíduos estão apresentados na Tabela 7. Verifica-se que todas as correlações foram de elevada magnitude, revelando a estreita relação entre as características.

Foi encontrada alta correlação positiva do poder calorífico superior com o teor de materiais voláteis, carbono e hidrogênio e alta correlação negativa entre poder calorífico superior e o teor de oxigênio. Estes resultados estão de acordo com os de Obernberger et al. (2006) que afirmaram que os teores de carbono e hidrogênio contribuíram positivamente para o poder calorífico superior e o teor de oxigênio contribuiu de forma negativa em biocombustíveis sólidos. Segundo Munalula & Meincken (2009), o poder calorífico aumenta com o aumento do teor de carbono.

TABELA 7 Coeficiente de correlação para as análises realizadas.

Variáveis	Correlação
Extrativos – holocelulose	-0,6937
Cinzas – materiais voláteis	-0,9550
Cinzas – poder calorífico superior	-0,8052
Cinzas – carbono	-0,9045
Cinzas – hidrogênio	-0,8387
Cinzas – oxigênio	0,9212
Holocelulose – poder calorífico superior	0,6567
Materiais voláteis – poder calorífico superior	0,7525
Materiais voláteis – carbono	0,7782
Materiais voláteis – hidrogênio	0,8464
Materiais voláteis – oxigênio	-0,8106
Poder calorífico superior – carbono	0,7547
Poder calorífico superior – hidrogênio	0,7604
Poder calorífico superior – oxigênio	-0,7643
Carbono – hidrogênio	0,7140
Carbono – oxigênio	-0,9793
Hidrogênio – oxigênio	-0,8076
Nitrogênio – relação C/N	-0,7056
Carbono – relação C/H	0,6704
Relação C/H – relação C/N	0,7263

Esperava-se encontrar alta correlação do teor de lignina, extrativos e carbono fixo com o poder calorífico superior, o que não ocorreu, provavelmente, devido à grande variabilidade dos resíduos utilizados neste estudo. Entretanto, o teor de holocelulose apresentou associação mediana e positiva com o poder calorífico superior.

7 CONCLUSÃO

- ❖ De forma geral, todos os resíduos apresentaram potencial para utilização energética.
- ❖ Na análise elementar, o teor de carbono variou de 42% a 49%, o que é esperado para materiais lignocelulósicos, exceto para a casca de arroz, que foi de 39%.
- ❖ A casca de arroz apresentou maior teor de lignina, o que seria interessante para a produção de energia. No entanto, esse resíduo possui alto valor de cinzas e oxigênio e baixo de carbono, o que, possivelmente, acarretou em redução no poder calorífico e carbono fixo.
- ❖ Os demais resíduos apresentaram características semelhantes, com destaque para o sabugo do milho, que apresentou maior poder calorífico, seguido do caule do café. Ambos contêm também alto teor de carbono, carbono fixo e materiais voláteis.
- ❖ Todos os resíduos apresentaram grande quantidade de materiais voláteis e baixo teor de carbono fixo.
- ❖ O poder calorífico superior apresentou alta correlação positiva com o teor de materiais voláteis, carbono e hidrogênio, e negativa com teor de oxigênio.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, A.F.B. **Cultivo do feijão da primeira e segunda safras na região Sul de Minas Gerais**. Brasília: EMBRAPA Arroz e Feijão, 2005. (Sistemas de Produção, 6). Disponível em:

<<http://www.sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Feijao/FeijaoPrimSegSafraSulMG/psementes.htm>>. Acesso em: 10 out. 2009.

AMATO, G.W. Casca: agregando valor ao arroz. In: ENCONTRO DA WORLD ASSOCIATION INDUSTRIAL AND TECHNOLOGICAL RESEARCH ORGANIZATIONS, 1., 2002, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: WAITRO, 2002. Disponível em: <www.irga.rs.gov.br/arquivos/20050815133443.pdf>. Acesso em: 1 out. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1983. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. **Normas técnicas ABCP**. São Paulo, 1974. 6p.

BIANCHI, M.L. **Polpação de palha de milho utilizando-se diferentes processos organosolv**. 1995. 76f. Dissertação (Mestrado em Química)- Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BOSE, M.L.V.; MARTINS FILHO, J.G. O papel dos resíduos agroindustriais na alimentação de ruminantes. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.10, n.119, p.3-7, nov. 1984.

BRAHAN, J.E.; BRESSANI, R. **Pulpa de café**: composición, tecnología y utilización. Bogota: Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá, 1978. 10p.

BRITO, J.O. Expressão da produção florestal em unidades energéticas. In: CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1.; CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., 1993, Curitiba. **Anais...** Curitiba: UFPR, 1993. v.3, p.280-282.

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

BRUM, S.S. **Caracterização e modificação química de resíduos sólidos do beneficiamento do café para produção de novos materiais**. 2007. 138p. Dissertação (Mestrado em Agroquímica)-Universidade Federal de Lavras, Lavras.

BRUM, S.S.; SILVA, V.L.; BIANCHI, M.L.; REIS, M.C. Caracterização química do resíduo da colheita de feijão (palha de feijão). In: CONGRESSO DOS PÓS-GRADUANDOS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS, 15., 2006, Lavras. **Anais...** Lavras: UFLA, 2006. 1 CD-ROM.

CARVALHO, F.C. Disponibilidade de resíduos agroindustriais e do beneficiamento de produtos agrícolas. In: SIMPÓSIO SOBRE UTILIZAÇÃO DE SUBPRODUTOS AGROINDUSTRIAIS E RESÍDUOS DE COLHEITA NA ALIMENTAÇÃO DE RUMINANTES, 1., 1992, São Carlos. **Anais...** São Carlos: UEPAE, 1992. p.7-27.

CENTRO DE ESTUDOS AGRÍCOLAS. **Balço de disponibilidade interna de gêneros alimentícios de origem vegetal**. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1991. 70p.

CHAGAS, E.; ARAÚJO, A.P.; TEIXEIRA, M.G.; GUERRA, J.G.M. Decomposição e liberação de nitrogênio, fósforo e potássio de resíduos da cultura do feijoeiro. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, MG, v.31, n.4, p.723-729, jul./ago. 2007.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Destaque**: levantamento de café safra 2008/2009. Brasília, 2009a. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/6graos_08.09.pdf>. Acesso em: 5 set. 2009.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Brasília, 2009b. 16p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Séries históricas**: safras de grãos. Brasília, 2010. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conabweb/index.php?PAG=131>>. Acesso em: 3 mar. 2010.

CORREA NETO, V. **Potencial da cogeração e planejamento da expansão do setor elétrico**. Disponível em:
<http://www.apta.sp.gov.br/cana/anexos/Position_paper_sessao1_Vicente.pdf>.
Acesso em: 22 mar. 2009.

CRUZ, J.M.; DOMÍNGUEZ, J.M.; DOMÍNGUEZ, H.; PARAJÓ, J.C.
Preparation of fermentation media from agricultural wastes and their
bioconversion to xylitol. **Food Biotechnology**, New York, v.14, n.1, p.79-97,
2000.

DELLA, V.P.; HOTZA, D.; JUNKES, J.A.; OLIVEIRA, A.P.N. Estudo
comparativo entre sílica obtida por lixívia ácida da casca de arroz e sílica obtida
por tratamento térmico da cinza de casca de arroz. **Química Nova**, São Paulo,
v.29, n.6, p.1175-1179, nov./dez. 2006.

DEMAJORIVIC, J. Da política tradicional de tratamento do lixo à política de
gestão de resíduos sólidos: as novas prioridades. **Revista de Administração de
Empresas**, São Paulo, v.35, n.3, p.88-93, 1995.

DINIZ, J.; CARDOSO, A.L.; STAHL, J.A.; VILLETTI, M.A.; MARTINS, A.F.
Poder calorífico da casca de arroz, caroço de pêssego, serragem de eucalipto e
de seus produtos de pirólise. **Revista Ciência e Natura**, Santa Maria, v.26, n.2,
p.25-32, jul./dez. 2004.

FURLANI, P.R.; GALLO, J.R. Determinação de silício em material vegetal pelo
método colorimétrico do “azul-de-molibdênio”. **Bragantia**, Campinas, v.37, n.2,
p.5-9, jan. 1978.

GIOMO, G.S. **Informações eletrônicas**: centro de café. Campinas: Instituto
Agrônomo de Campinas, 2006. 10p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Anuário
estatístico do Brasil**. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em:
<<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 10 out. 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Séries
estatísticas e séries históricas**. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em:
<http://www.ibge.gov.br/series_estatisticas/tema.php?idtema=1>. Acesso em:
20 jan. 2010.

JENKINS, B.M. Fuel properties for biomass materials. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON APPLICATION AND MANAGEMENT OF ENERGY IN AGRICULTURE: THE ROLE BIOMASS FUELS, 1., 1990, New Delhi. **Proceedings...** Ludhiana: Punjab Agricultural University, 1990. p.21-23.

LIMA, E.G. de; SILVA, D.A. da. Resíduos gerados em indústria de móveis de madeira situados no pólo moveleiro de Arapongas – PR. **Revista Floresta**, Curitiba, v.35, n.1, p.105-116, jan./abr. 2005.

MACEDO, I.C. de. **Geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil**: situação atual, oportunidades e desenvolvimento. Brasília: Secretaria Técnica do Fundo Setorial de Energia, 2001. Disponível em: <<http://www.cgee.org.br>>. Acesso em: 29 set. 2009.

MARABEZI, K.; CHRISTOFOLETTI, G.B.; GURGEL, L.V.A.; ZAMBON, M.D.; ARANTES, T.M.; CURVELO, A.A.S. Determinação de lignina em bagaço e palha de cana-de-açúcar. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE QUÍMICA, 32., 2009, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: UFCE, 2009. 1 CD-ROM.

MEHTA, P.K. Rice husk ash: a unique supplementary cementing material. In: _____. **Advances in concrete technology**. Ottawa: Canmet, 1992. p.407-431.

MORI, F.A.; MENDES, L.M.; TRUGILHO, P.F.; CARDOSO, M.G. Utilização de madeiras de *Eucalyptus* e nativas no armazenamento da aguardente de cana de açúcar. In: SEMINÁRIO SUL-MINEIRO DE CACHAÇA DE ALAMBIQUE, 1., 2002, Lavras. **Anais...** Lavras: UFPA, 2002. p.32-33.

MOSCARDINI FILHO, E.; SALLES, C.G.; MATOS, J.R.; MERCURIL, L.P. Estudo termoanalítico de palha de café utilizada como fertilizante agrícola. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE QUÍMICA, 32., 2009, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: UFCE, 2009. 1 CD-ROM.

MUNALULA, F.; MEINCKEN, M. An evaluation of South African fuelwood with regards to calorific value and environmental impact. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.33, n.3, p.415-420, Mar. 2009.

NASCIMENTO, S.M.; DUTRA, R.I.J.P.; NUMAZAWA, S. Resíduos de indústria madeireira: caracterização, conseqüências sobre o meio ambiente e opções de uso. **Holos Environment**, Rio Claro, v.6, n.1, p.8-21, 2006.

OBERNBERGER, I.; BRUNNER, T.; BARNTHALER, G. Chemical properties of solid biofuels: significance and impact. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.30, n.11, p.973-982, Nov. 2006.

OLIVEIRA, L.K. **Desenvolvimento de materiais adsorventes de óleos a partir de resíduos da agroindústria e sua aplicação na ração de aves**. 2009. 74p. Dissertação (Mestrado em Agroquímica)-Universidade Federal de Lavras, Lavras.

PEREIRA, M.A. **Confecção de móveis com a madeira de *Coffea arabica* L.** 2008. 59p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira)-Universidade Federal de Lavras, Lavras.

PITARELO, A.P. **Avaliação da susceptibilidade do bagaço e da palha de cana-de-açúcar à bioconversão via pré-tratamento a vapor e hidrólise enzimática**. 2007. 125p. Dissertação (Mestrado em Química)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

QUIRINO, W.F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. Brasília: LPF/IBAMA, 2003. 14p.

QUIRINO, W.F.; VALE, A.T.; ANDRADE, A.P.A.; ABREU, V.L.S.; AZEVEDO, A.C.S. Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. **Revista da Madeira**, São Paulo, v.89, n.1, p.100-106, Nov. 2005.

RAVEENDRAN, K.; GANESH, A.; KHILAR, K.C. Influence of mineral matter on biomass pyrolysis characteristics. **Fuel**, London, v.74, n.12, p.1812-1822, Dec. 1995.

REYES, J.; PERALTA-ZAMORA, P.; DURÁN, N. Hidrólise enzimática de casca de arroz utilizando-se celulasas, efeito de tratamentos químicos e fotoquímicos. **Química Nova**, São Paulo, v.21, n.2, p.140-143, mar./abr. 1997.

RIBEIRO, A.S.; MACHADO, A.A. Carbonização de resíduos do processamento mecânico da madeira de eucalipto. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v.15, n.1, p.1-7, jan./fev. 2005.

ROCHA, F.C.; GARCIA, R.; FREITAS, A.W.P.; SOUZA, A.L.; GOBBI, K.F.; VALADARES FILHO, S.C.; TONUCCI, R.G.; ROCHA, G.C. Casca de café em dietas para vacas em lactação: consumo, digestibilidade, produção e composição de leite. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, MG, v.35, n.5, p.2163-2171, set./out. 2006.

SALAZAR, R.F.S.; SILVA, G.L.P.; SILVA, M.L.C.P. Estudo da composição da palha de milho para posterior utilização como suporte na preparação de compósitos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 6., 2005, Campinas. **Anais...** Campinas: UNICAMP, 2005. p.6.

SANTIAGO, A.R.; ANDRADE, A.M. de. Carbonização de resíduos do processamento mecânico da madeira de eucalipto. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v.15, n.1, p.1-7, jan./fev. 2005.

SERVIÇO BRASILEIRO DE RESPOSTAS TÉCNICAS. **Destaque**: arroz. Brasília, 2007. Disponível em: <<http://www.sbirt.ibict.br>>. Acesso em: 20 maio 2008.

SEYE, O.; CORTEZ, L.A.B.; GÓMEZ, E.O. Estudo cinético da biomassa a partir de resultados termogravimétricos. **Energia no Meio Rural**, Campinas, ano 3, 2003. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000220000020022&script=sci_arttext>. Acesso em: 19 out. 2009.

SILVA, A.M.; BENTES, M.A.; MEDRADO, S.B.; CARVALHO JÚNIOR, J.A. Estudo da utilização da biomassa em substituição parcial ao carvão mineral na fabricação do coque na coqueira da CSN. **Revista Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v.5, n.1, p.40-45, jul./set. 2008.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA. **Fatos e números do Brasil florestal**. São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.sbs.org.br/FatoseNumerosdoBrasilFlorestal.pdf>>. Acesso em: 17 jan. 2010.

SOUZA, R.C.R.; SANTOS, E.C.S.; MORAIS, M.R.M.; SEYS, O. Carbonização da casca de arroz (*Oriza sativa*) para uso energético. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 36., 2007, Bonito. **Anais...** Bonito: UEMS, 2007. p.1-6.

SOUZA, R.C.R.; SEYE, O.; SANTOS, E.C.S.; MORAIS, M.R.; DINIZ, J.T.A.; BARROS, A.O.; BARROSO, L.N. **Estudo do aproveitamento de biomassa para produção de eletricidade no Estado de Roraima**: relatório final. Manaus: CDEAM/UFAM, 2005. 43p.

TRUGILHO, P.F.; LIMA, J.T.; MORI, F.A. Correlação canônica das características químicas e físicas de clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, Lavras, v.9, n.1, p.66-80, jan./jun. 2003.

VALE, A.T.; GENTIL, L.V. Produção e uso energético de biomassa e resíduos agroflorestais. In: _____. **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III**. Rio Branco: Suprema, 2008. p.195-241.

VILELA, F.G.; PEREZ, J.R.O.; TEIXEIRA, J.C.; REIS, S.T. Uso da casca de café melosa em diferentes níveis na alimentação de novilhos confinados. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.25, n.1, p.198-205, jan./fev. 2001.

WARHURST, A.M.; FOWLER, G.D.; MCCONNACHIE, G.L.; POLLARD, J.T. **Carbon**, Elmsford, v.35, n.2, p.1039-1045, 1997.

WERTHER, J.; SAENGER, M.; HARTGE, E.; OGADA, T.; SIAGI, Z. Combustion of agricultural residues. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, v.26, n.1, p.1-27, 2000.

CAPÍTULO 2

Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos

1 RESUMO

Os briquetes são considerados lenha ecológica de alta qualidade, produzidos a partir da compactação de resíduos lignocelulósicos, a elevadas pressões, associadas ou não à temperatura. Este trabalho foi realizado com o objetivo de produzir e avaliar briquetes feitos a partir de diferentes resíduos de biomassa vegetal e testar diferentes tempos e temperaturas de briquetagem para alguns deles. O material utilizado foi composto de resíduos do processamento da madeira (maravalha e serragem); pergaminho do grão e caule do cafeeiro; caule e vagem do feijão; caule e vagem da soja; casca de arroz; folha, caule, palha e sabugo de milho e palha e bagaço de cana-de-açúcar, todos adquiridos na cidade de Lavras, MG. Os ensaios ocorreram no Laboratório de Energia da Biomassa Florestal da Universidade Federal de Lavras. A briquetagem foi realizada em briquetadeira da marca Lippel®, à pressão de 150 Bar (153 kgf/cm²). Foram testados diferentes tempos de briquetagem para a serragem da madeira, resíduo mais abundante, e diferentes temperaturas para a casca do arroz e o pergaminho do café. Na avaliação da qualidade dos briquetes determinaram-se a densidade relativa aparente, a resistência à compressão e o índice de combustão. Os resultados indicaram que o tempo e a temperatura de briquetagem interferiram na resistência mecânica dos briquetes. O melhor tempo de prensagem foi de 8 minutos e a temperatura de melhor desempenho foi 125 °C. Os briquetes produzidos a partir da casca de arroz apresentaram maior densidade e alta resistência mecânica. O maior índice de combustão foi encontrado para os briquetes da vagem do feijão.

2 ABSTRACT

Os briquettes are considered an ecologic wood fuel of high quality, produced from the lignocellulosic residue compaction at high pressures, associated or not to temperature. This study aimed to produce and evaluating the briquettes made from different residues of plant biomass and test different times and temperatures for some briquettes. The material utilized was composed of wood processing residues (wood shaving and sawdust), coffee bean parchment and coffee tree stem, beam stem and pod, soybean stem and pod, rice husk, corn leaf, stem, straw and cob and sugar cane straw and bagasse, all purchased in Lavras/MG city. The assays occurred in the Forest Biomass Energy Laboratory of the Federal University of Lavras. Briquetting was performed in a briquetter of the Lippel® mark at a pressure of 150 Bar (153 kgf/cm²). Different times were tested for briquetting sawdust from wood, waste more abundant, and different temperatures for rice husk and parchment coffee. For evaluation of the briquettes quality, the apparent relative density, compression resistance and Combustion Index were determined. The results indicated that the briquetting time and temperature interfered in the mechanical resistance of the briquettes. The best pressing time was of eight minutes and the temperature of best performance was of 125 °C. The briquettes produced from rice husk presented higher density and high mechanical density. The highest Combustion Index was found for the bean pod briquettes.

3 INTRODUÇÃO

A discussão sobre formas alternativas de energia é de grande importância para o cenário energético atual. O Brasil e o mundo se encontram em crescente aumento populacional, o que ocasiona maior demanda e uso de produtos para a geração de energia, principalmente nos países onde a madeira é amplamente utilizada para este fim.

Uma das formas de se reduzir a pressão sobre florestas e, conseqüentemente, o desperdício se dá por meio do aproveitamento dos resíduos. O resíduo, depois de gerado, necessita de um destino adequado, pois, além de ocasionar impactos ambientais, representa perda de matéria-prima e energia, exigindo investimentos significativos no tratamento de controle da poluição por ele gerada.

Neste contexto, destaca-se a briquetagem, processo no qual os resíduos são compactados em diferentes formatos, e o produto gerado é chamado briquete. Estes resíduos podem ser de diferentes origens, tais como serragem, bagaço de cana, casca de café, palha e sabugo de milho, dentre outros.

Durante a briquetagem, os resíduos são densificados utilizando, na maioria das vezes, temperatura e pressão. A alta temperatura faz com que a lignina se torne plástica e atue como elemento aglomerante das partículas da biomassa durante a compactação, justificando a não utilização de aglomerantes artificiais como as resinas e ceras (Silva, 2007).

De acordo com Brosch & Furuno (1968), o briquete teve origem em 1848, quando foi concedida uma patente a William Easby, para um método de conversão de carvão miúdo em torrões sólidos. Em breve descrição do processo, ele menciona que: “A utilidade e a vantagem da descoberta são que, através desse processo, um artigo de pequeno valor, quase desprezível, pode ser convertido em um artigo valioso de combustível para navios a vapor,

forjas, culinária e outras finalidades, assim economizando o que agora é perdido”.

Os briquetes podem substituir a lenha em sua totalidade e dar um destino viável econômica e ambientalmente aos resíduos. Além de possuírem formato regular e constituição homogênea, o que resulta em queima uniforme do material, ser de fácil manuseio e transporte, de baixa umidade, e por possuir maior densidade, tem seu poder calorífico aumentado.

Diante do exposto, este trabalho foi realizado com o objetivo de produzir e avaliar briquetes feitos a partir de diferentes resíduos de biomassa vegetal e testar diferentes tempos e temperaturas de briquetagem para alguns deles.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Definição e composição de briquetes

Os briquetes são considerados lenha de qualidade, produzidos a partir da compactação de resíduos lignocelulósicos, utilizando pressão e temperatura (Silva, 2007).

Segundo Fontes et al. (1984), por meio da briquetagem consegue-se um combustível com homogeneidade granulométrica, maior densidade e resistência à geração de finos. O efeito de densificação proporcionado pela briquetagem produz um combustível com maior concentração energética por unidade de volume que, aliado à resistência adquirida, viabiliza técnica e economicamente o transporte a distâncias maiores. Além disso, os briquetes apresentam formato regular e constituição homogênea.

Os briquetes podem ser produzidos utilizando apenas um material lignocelulósico ou a mistura deles. É comum adicionar serragem aos produzidos com outros materiais e o carvão vegetal, para aumentar o poder calorífico. Para briquetes de carvão vegetal, misturam-se aglutinantes de natureza diversa, sendo os mais utilizados os de amido de milho (Quirino, 2003).

Dentre os vários materiais lignocelulósicos podem-se utilizar casca e galho de árvores, aparas de madeira, serragem, maravalhas, bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz, palha, caule e sabugo de milho, dentre outros.

Outra grande vantagem da briquetagem é a possibilidade de aproveitamento de resíduos lignocelulósicos carbonizados em geral (Fontes et al., 1984).

4.2 Briquetagem

Nos dias atuais, é possível utilizar grande variedade de resíduos orgânicos na produção de energia por meio de tecnologias simples. Uma delas é

a briquetagem, que consiste na aplicação de pressão a uma massa de partículas, com ou sem adição de ligante, e com ou sem tratamento térmico (Saleme, 1992).

O processo de briquetagem, segundo SBRT (2007), é físico e consiste na compactação do resíduo em forma de cilindros ou retângulos, por meio da geração mecânica de elevadas pressões e temperaturas, com o objetivo de aumentar a sua densidade, facilitando seu transporte, armazenamento e otimizando as características energéticas dos resíduos vegetais.

De acordo com Quirino & Brito (1991), a briquetagem é uma forma muito eficiente de concentrar a energia disponível na biomassa. Os autores exemplificam esse fato na consideração de que 1,00 m³ de briquetes contém, pelo menos, cinco vezes mais energia que 1,00 m³ de resíduo, levando-se em consideração a densidade a granel e o poder calorífico médio desse material.

Alves Júnior & Santos (2002) afirmam que o processo de briquetagem ou a transformação de madeira em briquetes consiste na trituração da madeira (moagem) e posterior compactação a elevadas pressões, o que pode provocar a elevação da temperatura do processamento na ordem de 100°C. O aumento da temperatura provoca a "plastificação" da lignina, substância que atua como elemento aglomerante das partículas de madeira. De acordo com o mesmo autor, para que a briquetagem tenha sucesso, o material deve ter umidade entre 8% a 15% e o tamanho de partícula entre 5 a 10 mm.

O processo de briquetagem descrito anteriormente se refere à produção a partir de resíduos lignocelulósicos, em que o ligante é a lignina. Em processos que utilizam, na produção de briquetes, somente o carvão, por exemplo, é necessária a utilização de um aglomerante artificial, pois, neste caso, a lignina já foi degradada, não é mais plástica e não faz o papel de aglomerante.

4.2.1 Equipamentos de briquetagem – briquetadeiras

Existem diferentes tipos de briquetadeiras utilizadas na compactação da biomassa, cada uma com um princípio de funcionamento.

4.2.1.1 Prensa briquetadeira de pistão

A compactação acontece por meio de golpes produzidos sobre os resíduos por um pistão acionado por meio de dois volantes. Do silo de armazenagem (aéreo ou subterrâneo) os resíduos são transferidos para um dosador e briquetados em seguida (forma cilíndrica). O briquete deste processo tem densidade de 1.000 a 1.300 kg/m³, poder calorífico inferior de 4.800 kcal/kg, materiais voláteis iguais a 81% e cinzas de 1,2% (SBRT, 2007).

4.2.1.2 Prensa briquetadeira por extrusão

De acordo com a Gestão... (2003), a extrusão em altas pressões e temperaturas, por máquina rotativa, oferece um produto homogêneo, sem aglomerantes, a temperaturas de 150° a 200°C. A alta temperatura é obtida pelo atrito dentro das câmaras de compressão antes da extrusão, liquefazendo a lignina do material. Ao sofrer esfriamento, a lignina se transforma em aglomerante natural e cria a camada externa contra a umidade do ar.

Posteriormente, o material é submetido a altas pressões, tornando-se mais compacto. No final do processo, o material é naturalmente resfriado, solidificando-se e resultando em um briquete com elevada resistência mecânica. A lignina solidificada na superfície do briquete o torna também resistente à umidade natural (SBRT, 2007).

Nesse caso, ainda segundo a SBRT (2007), o briquete apresenta densidade de 1.200 a 1.400 kg/m³, poder calorífico superior de 4.900 kcal/kg, voláteis de 85% e cinzas de 1%.

4.2.1.3 Prensa briquetadeira hidráulica

De acordo com Quirino (1991), a briquetadeira hidráulica é um equipamento que usa um pistão acionado hidráulicamente; o material a ser compactado é alimentado lateralmente por uma rosca sem fim. Uma peça frontal ao êmbolo abre e expulsa o briquete quando se atinge a pressão desejada. Não é um processo extrusivo e a pressão aplicada, geralmente, é menor que em outros métodos, produzindo briquetes de menor densidade.

As briquetadeiras de pistão hidráulico aceitam material com 18%-20% de conteúdo de umidade (Lucena et al., 2008).

4.2.1.4 Prensa briquetadeira peletizadora

É um equipamento que opera pelo processo extrusivo, com princípio semelhante ao dos equipamentos de produção de ração animal, em que há a necessidade de injeção de vapor para aquecer e corrigir a umidade. Esses equipamentos vêm sendo experimentados para compactação de resíduos com resultados razoáveis. Operando com bagaço, produz peletes de diâmetro igual a 10 mm e comprimento de 30 a 40 mm, densidade relativa de 1.200 kg/m³ e densidade a granel de 550 kg/m³ (Quirino, 1991).

Segundo Lucena et al. (2008), as peletizadoras trabalham com resíduos com até 20% de umidade, usando pressões de 80 a 320 kg/cm².

2.2.1.5 Prensa briquetadeira enfardadeira

De acordo com Quirino (1991), como o próprio nome indica, o equipamento comprime e amassa o resíduo, elevando a densidade do bagaço de cana com 20% de umidade a 500 kg/m³. Este processo não exige pré-secagem do material, o que permite a secagem posterior. No entanto, é aconselhável o enfardamento após a secagem.

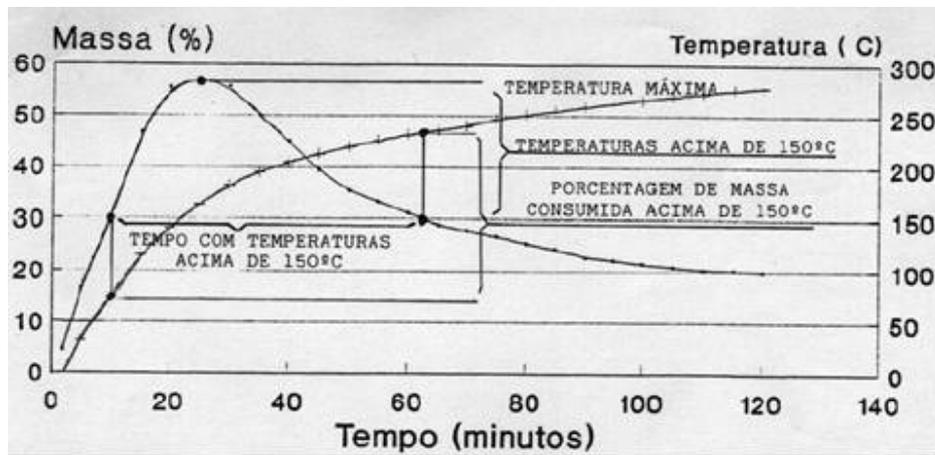
4.3 Avaliação da qualidade dos briquetes

A qualidade dos briquetes, segundo Komarek (1990), citado por Quirino & Brito (1991), é avaliada por meio de algumas de suas propriedades peculiares ou baseada em algumas de suas características de comportamento durante o uso.

De acordo com Quirino & Brito (1991), os testes que avaliam as propriedades mecânicas dos briquetes são usualmente os mais empregados. A resistência à compressão, por exemplo, determina a capacidade de empilhamento na estocagem. O teste de tamboramento, ou índice de quebra e abrasão, determina a resistência à abrasão provocada durante o transporte e o manuseio natural dos briquetes. Todos estes testes medem certos aspectos de qualidade.

No entanto, segundo os autores, esses resultados devem ser interpretados com cuidado porque são influenciados pelo tamanho e pela forma dos briquetes, e, ainda, pelas propriedades dos materiais a partir dos quais são produzidos. Para muitos propósitos, a densidade é o parâmetro de qualidade mais importante.

Para avaliar o comportamento dos briquetes em uso, Quirino & Brito (1991) elaboraram um dispositivo de teste. Este aparelho possibilitou a verificação da temperatura e da massa que estava sendo consumida a cada instante durante a combustão, o que permitiu a elaboração de curvas de temperatura x tempo e massa x tempo, ilustradas na Figura 1. A partir de valores obtidos em pontos dessas curvas elaborou-se um índice denominado "índice de combustão", ou ICOM.



Fonte: Quirino & Brito (1991).

FIGURA 1 Curvas típicas “temperatura x tempo” e “porcentagem de massa consumida x tempo”, com seus pontos característicos, para a obtenção do ICOM.

O índice de combustão foi calculado pela Equação 1:

$$\text{ICOM} = (A \times B) / (100 \times C) \quad (1)$$

em que

A = porcentagem do tempo de teste no qual a temperatura permanece acima de 150°, tomada em relação ao tempo total de 120 minutos;

B = porcentagem da temperatura máxima atingida no teste, em relação à temperatura de 150°C;

C = porcentagem da massa total consumida gerando temperaturas acima de 150°C.

O tempo total de 120 minutos foi adotado pelos autores, pois ensaios preliminares mostraram ser este o tempo suficiente para a combustão total dos briquetes. A temperatura de 150°C foi estabelecida após verificação prévia de

que em nenhum ensaio realizado a temperatura máxima durante a combustão dos briquetes foi inferior a este valor.

4.4 Vantagens e utilização dos briquetes

Segundo Ormond (2006), o briquete é um substituto da lenha 100% natural e ecológico e evita o desmatamento. Apresenta forma regular, constituição homogênea e é de grande utilização para a geração de energia, principalmente em fornos industriais.

Os briquetes reduzem o impacto ambiental, ajuda a conservar florestas, sua matéria-prima é disponível o ano todo em determinadas regiões, eliminam resíduos e são de tamanho uniforme, o que facilita seu manuseio, transporte e armazenamento.

Os briquetes podem ser utilizados para diversos fins, tanto em indústrias como em residências, em fornalhas ou caldeiras que queimam lenha ou qualquer outro material particulado. Pode ser utilizado em cerâmicas, pizzarias, padarias e indústrias em geral. O uso em residências é como combustível para lareiras, fogões e fornos.

De acordo com o Centro Nacional de Referência em Biomassa, CENBIO (2009), nas capitais e grandes cidades, o briquete tem papel destacado, competindo diretamente com a lenha e o carvão vegetal. Atualmente, os fabricantes não conseguem atender à demanda de briquetes na cidade de São Paulo, onde existem 5.000 pizzarias e 8.000 padarias, das quais 70% utilizam fornos à lenha.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Produção dos briquetes

Para a produção dos briquetes foram utilizados os resíduos do processamento da madeira (maravalha e serragem), pergaminho do grão e caule do cafeeiro, caule e vagem do feijão, caule e vagem da soja, casca de arroz, folha, caule, palha e sabugo do milho e palha e bagaço da cana-de-açúcar, todos adquiridos na cidade de Lavras, MG.

Os materiais foram levados para o Laboratório de Energia da Biomassa Florestal da Universidade Federal de Lavras. O caule do café; o caule e a vagem do feijão; o caule e a vagem da soja; a folha, o caule, a palha e o sabugo do milho e a palha da cana-de-açúcar passaram por processamento em moinho martelo. Após moagem, estes resíduos apresentaram granulometria de, aproximadamente, 4 mm.

A briquetadeira utilizada neste estudo, apresentada na Figura 2, foi da marca Lippel®, modelo LB 32, fabricada em aço inox e porcelana, com cilindro de força máxima de 10 toneladas e resistência elétrica atingindo até 300°C.

A pressão empregada na produção dos briquetes foi de 150 Bar (153 kgf/cm²) e a quantidade de material foi limitada pelo volume do cilindro da briquetadeira utilizada.

Após a produção, os briquetes foram encaminhados para uma câmara climatizada para homogeneização da umidade, onde permaneceram até atingir massa constante. A umidade final dos briquetes foi de 12%.



FIGURA 2 Briquetadeira hidráulica para laboratório.

5.2 Avaliação dos briquetes

5.2.1 Resistência mecânica e densidade

Os ensaios mecânicos para avaliar a resistência à compressão dos briquetes foram feitos em uma máquina universal de ensaios, da marca EMIC[®], de forma semelhante aos realizados por Quirino & Brito (1991). A velocidade de carregamento foi de $0,03 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ e a carga foi aplicada no sentido diametral dos briquetes, como ilustrado na Figura 3.



A



B

FIGURA 3 Ensaio mecânico, (A) e (B) carga aplicada no sentido do diâmetro dos briquetes.

A densidade aparente foi determinada pelo método estequiométrico, ilustrado na Figura 4, que consiste em obter o volume a partir de medições, utilizando-se um paquímetro e a massa em uma balança com precisão de 5mg.



A



B

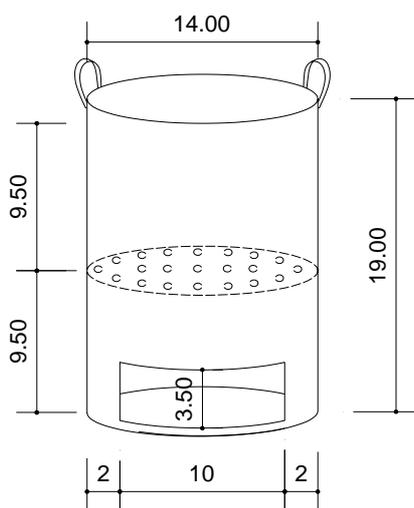


C

FIGURA 4 Obtenção da densidade, (A) (B) medição das dimensões e (C) massa dos briquetes.

5.2.2 Ensaio de combustão

Para avaliar o comportamento dos briquetes na combustão foi construído um dispositivo de teste semelhante ao desenvolvido por Quirino & Brito (1991). Este dispositivo foi composto por um combustor fabricado em chapa de ferro galvanizada (dimensões ilustradas na Figura 5), uma base de alumínio e madeira (Figura 6), um controlador de temperatura, uma balança com precisão de 5 mg e um anteparo de alumínio (Figura 7) que envolveu o combustor para protegê-lo da interferência do ar durante a combustão. A base de madeira tem a função de realizar o isolamento térmico, impedindo que o calor atinja a balança.



A



B

FIGURA 5 Combustor, (A) dimensões, em centímetros, (B) detalhe: grelha e orifício de ignição.

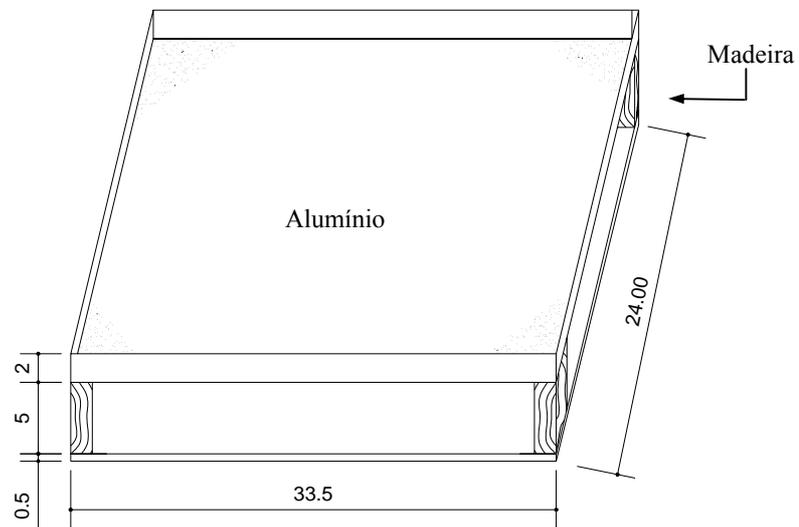


FIGURA 6 Bases de madeira e alumínio

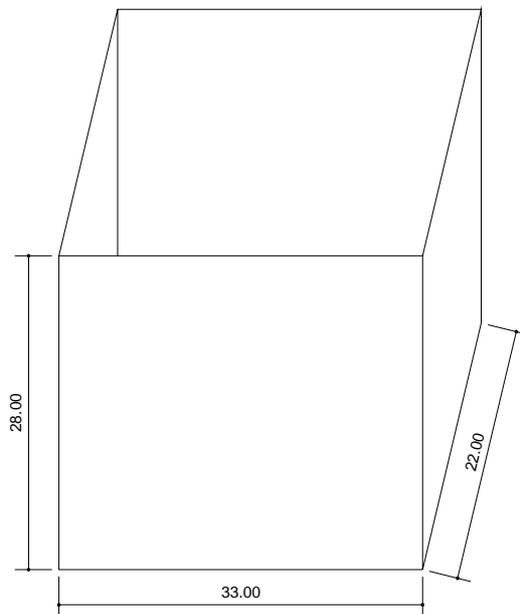


FIGURA 7 Aparato de alumínio

Inicialmente, as bases e o combustor foram colocados sobre a balança de precisão. O combustor foi carregado com os briquetes. A ignição ocorreu com a combustão de 10g de álcool, que foram depositados em uma placa de Petri localizada sobre a base de alumínio e abaixo da grelha. O aparato foi colocado em seguida e, por último, o medidor de temperatura. O funcionamento do equipamento está ilustrado na Figura 8.

Com o equipamento mensuraram-se a massa e a temperatura em função do tempo durante a combustão e foi possível construir gráficos de tempo x temperatura e tempo x massa. A partir de pontos característicos desses gráficos calculou-se o índice de combustão (ICOM), utilizando-se a Equação 2, desenvolvida por Quirino & Brito (1991), com algumas modificações.

$$\text{ICOM} = (A \times B) / (100 \times C) \quad (2)$$

em que

A = porcentagem do tempo no qual a temperatura permanece acima de 150°C, em relação ao tempo total de teste até a temperatura final de 100°C;

B = porcentagem da temperatura máxima atingida em relação à temperatura de 150°C;

C = porcentagem da massa total consumida, gerando temperaturas acima de 150°C.

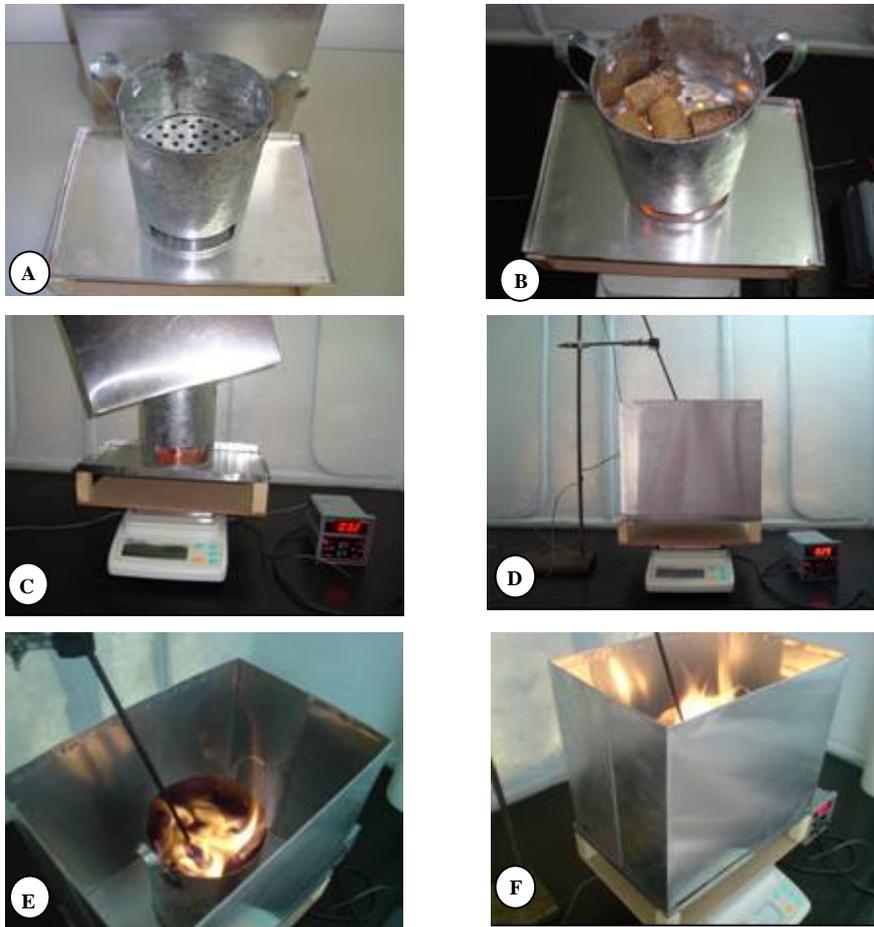


FIGURA 8 Funcionamento do equipamento combustor, (A) combustor; (B) combustor com briquetes e início da combustão; (C) anteparo protetor sendo colocado; (D) conjunto combustor, bases, balança e medidor de temperatura; (E) posição do sensor do medidor de temperatura; (F) combustão.

A massa de briquetes utilizada neste teste foi de (150 ± 20) g. O tempo foi variável e considerou-se o intervalo que foi do início da combustão até a temperatura final de 100°C .

Para efeito comparativo, realizou-se o ensaio de combustão em madeira maciça e carvão vegetal.

5.3 Ajuste do tempo de compactação

Inicialmente, foi realizado um experimento piloto, com diferentes tempos de compactação, em temperatura ambiente, para a obtenção do tempo de melhor desempenho na briquetagem. Utilizou-se como referência a serragem da madeira nos tempos apresentados na Tabela 1.

TABELA 1 Experimento piloto para ajuste do tempo de compactação.

Material	Tempo (min)
Serragem da madeira	2
	3
	4
	5
	7
	10

Na Tabela 2 são apresentados os valores obtidos para os ensaios dos briquetes de serragem em diferentes tempos.

TABELA 2 Densidade relativa aparente, ICOM e resistência mecânica dos briquetes, em função do tempo de briquetagem.

Material	Tempo (min)	Densidade aparente (g/cm³)	ICOM	Resistência mecânica (kgf/cm²)
Serragem	2	0,868	0,5490	167,74
	3	0,885	0,5442	197,58
	4	0,878	0,5207	211,10
	5	0,884	0,5378	212,84
	7	0,865	0,5123	216,27
	10	0,883	0,4577	224,29

Percebe-se, pelos dados da Tabela 2, que existe uma tendência de aumento da resistência mecânica à medida que o tempo de briquetagem aumenta. O mesmo não ocorreu para a densidade e o ICOM.

Os resultados de resistência mecânica à compressão e tempo foram utilizados para a avaliação da relação funcional, apresentada na Figura 9. Foi ajustado o modelo polinomial quadrático, o qual apresentou melhor performance.

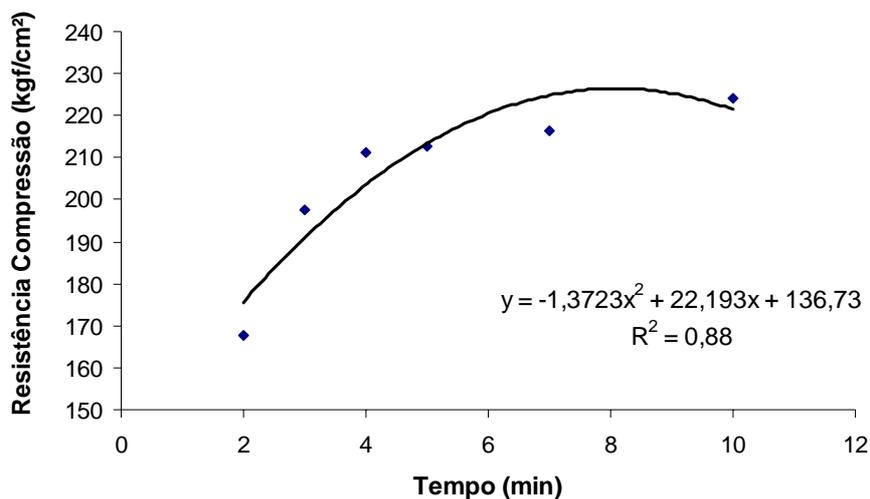


FIGURA 9 Resistência à compressão, em função do tempo de briquetagem

Após o ajuste da equação de regressão (modelo quadrático) foi determinado o seu ponto crítico, sendo, neste caso, um ponto de máximo. Para obter o ponto crítico da função basta tornar $\hat{Y} \equiv 0$ (diferencial de \hat{Y} identicamente nula), o que equivale resolver o seguinte sistema (Equação 3):

$$\frac{\partial Y}{\partial X} = 0 \quad (3)$$

ou seja,

$$(2 \times b2)X + b1 = 0 \quad (4)$$

Resolvendo o sistema, encontrou-se um valor de 8,09 minutos, sendo um ponto de máximo. Desta forma, considerou-se o tempo de 8 minutos para a confecção dos briquetes de todos os resíduos avaliados. Os briquetes que não obtiveram resultados satisfatórios, ou seja, não briquetaram e por isso não tinham condições de serem avaliados, foram produzidos com a inclusão de temperatura.

5.4. Ajuste da temperatura de briquetagem

Na Tabela 3 são apresentados os resíduos e as temperaturas utilizadas no ajuste da temperatura de briquetagem.

TABELA 3 Materiais e temperaturas utilizados para briquetagem.

Material	Temperatura (°C)
Pergaminho e casca de arroz	110
	115
	120
	125

Os resultados do ajuste da temperatura estão apresentados na Tabela 4.

Assim como no ajuste do tempo de briquetagem, o ajuste da temperatura não apresentou tendência definida para o ICOM e a densidade. Optou-se por utilizar os resultados de resistência mecânica para a determinação da melhor temperatura de briquetagem.

Nas Figuras 10 e 11 observam-se os resultados de resistência mecânica à compressão do pergaminho e da casca de arroz, respectivamente. Foram ajustados modelos polinomiais quadráticos, de melhores performances.

TABELA 4 Densidade relativa aparente, ICOM e resistência mecânica à compressão de briquetes produzidos em diferentes temperaturas.

Material	Temperatura (°C)	Densidade aparente (g/cm ³)	ICOM	Resistência mecânica (kgf/cm ²)
Pergaminho	110	0,889	0,4163	76,83
	115	0,915	0,4729	86,38
	120	0,913	0,4101	88,99
	125	0,946	0,4546	115,99
Arroz	110	0,909	0,4170	135,82
	115	0,997	0,5279	175,29
	120	0,985	0,5254	199,19
	125	1,077	0,4293	331,50

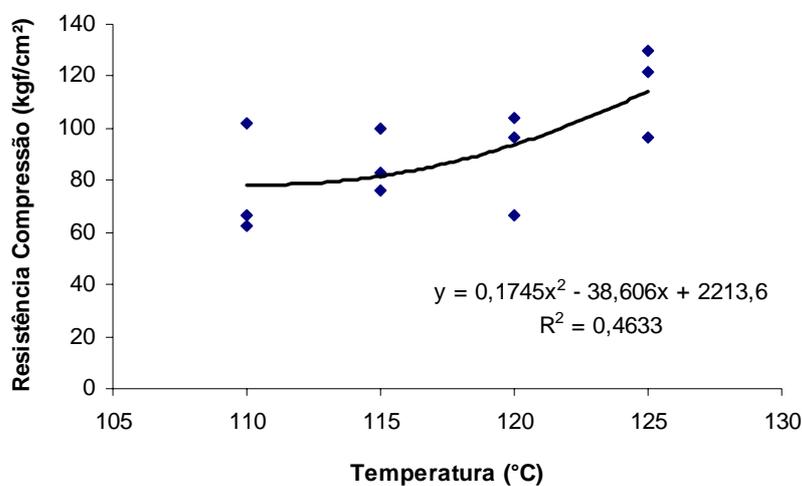


FIGURA 10 Resistência à compressão do briquete de pergaminho, em função da temperatura de briquetagem.

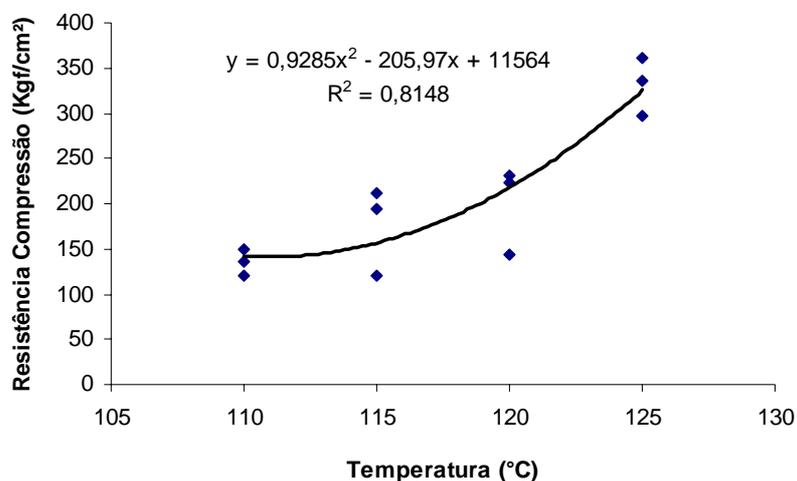


FIGURA 11 Resistência à compressão do briquete de casca de arroz, em função da temperatura de briquetagem.

Como os gráficos das Figuras 10 e 11 indicaram um aumento na resistência à compressão à medida que se aumentou a temperatura para os dois resíduos, considerou-se, então, a temperatura de 125°C como a de melhor desempenho.

5.5 Análise estatística

O experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado, com diferentes números de repetição por tratamento. As médias foram comparadas pelo teste Scott-Knott, a 5% de significância.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados médios das características avaliadas nos briquetes e o teste de comparação múltipla realizados estão apresentados na Tabela 5. Os briquetes foram produzidos com tempo de 8 minutos, pressão igual a 153 kgf/cm² e temperatura ambiente, com exceção dos briquetes feitos a partir de casca de arroz e pergaminho de café, que foram produzidos à temperatura de 125°C.

Verifica-se, pelos dados da Tabela 5, que houve diferença estatística para densidade dos briquetes dos diferentes resíduos, tendo o maior valor sido obtido para a casca do arroz, seguido do pergaminho do café, da vagem do feijão e da folha do milho. O menor valor foi para o bagaço de cana.

Os resultados estão de acordo com Quirino & Brito (1991) que encontraram densidades variando de 0,69 a 0,99 g/cm³, para briquetes produzidos com carvão vegetal misturado à serragem, carvão mineral, nitrato, cinzas e aglomerante e superiores aos determinados por Silva (2007), que encontrou densidade aparente média de 0,51 g/cm³.

Não foi possível determinar a resistência mecânica dos briquetes feitos a partir de maravalha. Este fato ocorreu porque, na realização do ensaio de compressão, os briquetes deste material se moveram. O ensaio não terminou quando o briquete rompeu, o que resultou em uma carga superior à que os briquetes realmente suportavam. Por isso não foi possível determinar a carga máxima real.

TABELA 5 Densidade relativa aparente, resistência mecânica e ICOM dos briquetes, ICOM da madeira e do carvão.

Material		Densidade aparente (g/cm ³)	Resistência mecânica (kgf/cm ²)	ICOM
Arroz	Casca do grão	1,077 A	331,50 A	0,4293 B
Cafê	Caule	0,807 F	42,26 G	0,5757 A
	Pergaminho	0,946 B	115,99 E	0,4546 B
Cana	Bagaço	0,606 G	69,29 F	0,4418 B
	Palha	0,841 E	167,92 D	0,4575 B
Feijão	Caule	0,888 C	282,47 B	0,6013 A
	Vagem	0,944 B	79,42 F	0,6464 A
Madeira	Serragem	0,903 C	190,23 D	0,5501 A
	Maravalha	0,850 E	-	0,4435 B
Milho	Caule	0,846 E	241,28 C	0,6384 A
	Folha	0,936 B	236,14 C	0,4315 B
	Palha	0,822 F	102,98 E	0,5971 A
	Sabugo	0,869 D	73,99 F	0,6308 A
Soja	Caule	0,815 F	223,95 C	0,4945 B
	Casca vagem	0,807 F	34,36 G	0,5284 B
	Carvão	-	-	0,5572 A
	Madeira	-	-	0,5169 B

1-Valores médios seguidos de mesma letra na coluna não diferem entre si, pelo de Scott-Knott, a 5% de significância.

A resistência mecânica apresentou resultados distintos estatisticamente. O maior valor encontrado foi para os briquetes produzidos a partir de casca de arroz, que apresentou maior densidade e o menor, para caule do café, este último de baixa densidade. O gráfico da Figura 12 representa a relação funcional entre a resistência à compressão e a densidade relativa aparente.

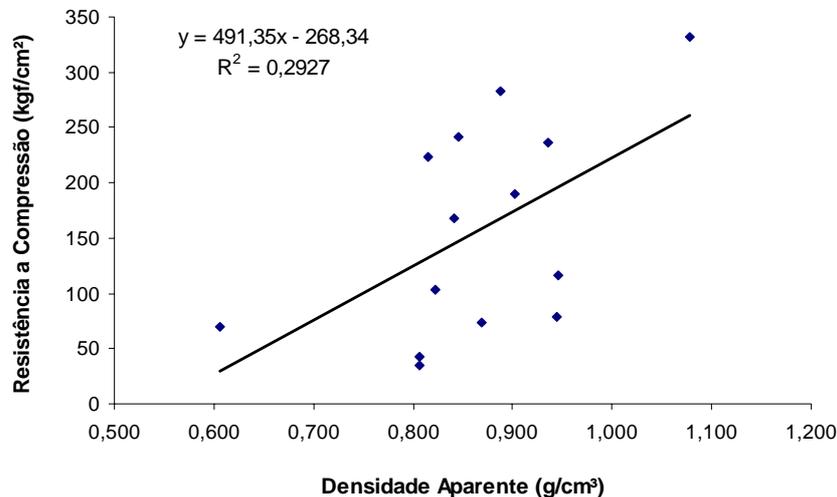


FIGURA 12 Relação funcional entre a resistência à compressão e a densidade relativa aparente.

Observando o gráfico da Figura 12 verifica-se que foi possível ajustar um modelo da reta que, apesar do baixo coeficiente de determinação, indica um aumento da resistência mecânica em função do aumento da densidade relativa aparente.

Quirino & Brito (1991), estudando briquetes produzidos com carvão vegetal misturado a serragem, carvão mineral, nitrato, cinzas e aglomerante, encontraram resistência à compressão média de 31,71 kgf/cm², valor este inferior aos determinados neste estudo. Fontes et al. (1984) encontraram 183,76 kgf/cm², 245,74 kgf/cm² e 229,70 kgf/cm², para briquetes produzidos a partir de carvão vegetal e resina termoplástica sintética, resina termoplástica natural e resina termorrígida, respectivamente.

A análise estatística do ICOM dividiu os resíduos em dois grupos, os quais são apresentados na Tabela 6.

TABELA 6 Grupos de briquetes conforme índice de combustão.

Grupo	Material	ICOM	
1	Café	Caule	0,5757
	Feijão	Caule	0,6013
		Vagem	0,6464
	Madeira	Serragem	0,5501
	Milho	Caule	0,6384
		Palha	0,5971
		Sabugo	0,6308
		Carvão	0,5572
2	Arroz	Casca do grão	0,4293
	Café	Pergaminho	0,4546
	Cana	Bagaço	0,4418
		Palha	0,4575
	Madeira	Maravalha	0,4435
	Milho	Folha	0,4315
	Soja	Caule	0,4945
		Casca vagem	0,5284
		Madeira	0,5169

Os resíduos do Grupo 1 apresentaram o mesmo comportamento durante a combustão e foram superiores aos do Grupo 2. A madeira maciça e o carvão, testemunhas do ensaio, foram classificados em grupos diferentes.

Os Índices de combustão observados na Tabela 6 estão de acordo com Quirino & Brito (1991) que encontraram valores de 1,23 a 0,31, para briquetes produzidos com carvão vegetal misturado a serragem, carvão mineral, nitrato, cinzas e aglomerante.

Nas Figuras 13 e 14 observam-se os gráficos de temperatura e massa, respectivamente, em função do tempo de ensaio de combustão do Grupo 1. Na Figura 13 verifica-se que os briquetes dos materiais do Grupo 1 tiveram seus picos de temperatura em torno de 10 minutos, com exceção da serragem (19 minutos) e do carvão (sem pico definido). O mesmo ocorreu para a redução de massa (Figura 14); apenas a serragem e o carvão apresentaram comportamento diferenciado. O carvão teve combustão mais estável que os demais materiais e demorou cerca de 120 minutos para atingir a temperatura final de 100°C e não apresentou pico definido de temperatura.

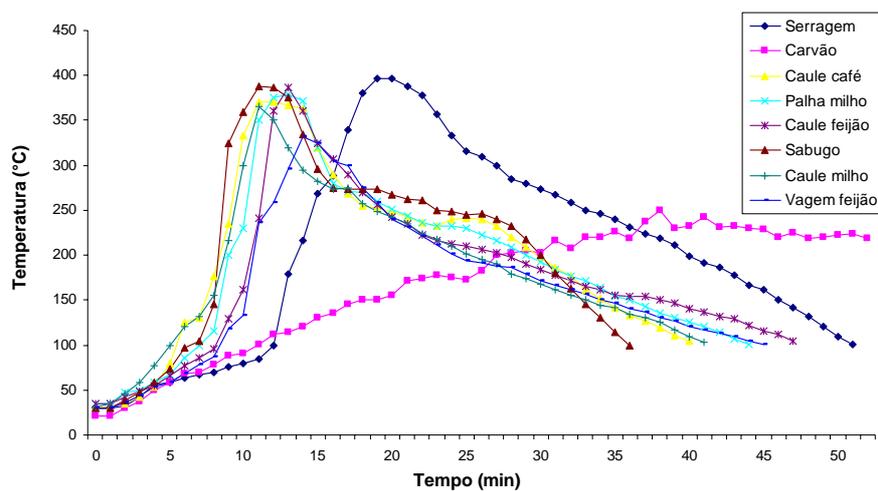


FIGURA 13 Gráfico da evolução da temperatura em função do tempo de combustão dos briquetes do Grupo 1.

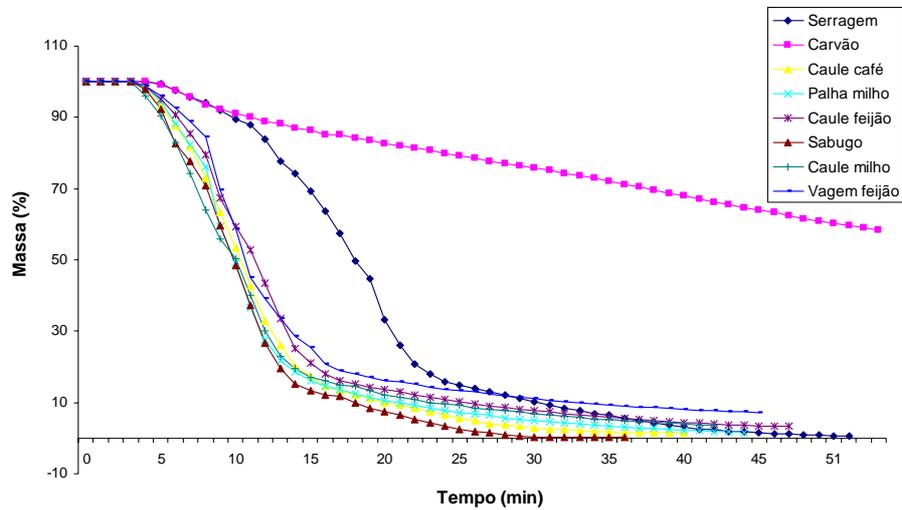


FIGURA 14 Gráfico da perda de massa em função do tempo de combustão dos briquetes do Grupo 1.

Nas Figuras 15 e 16 são apresentados os gráficos de temperatura e massa em função do tempo de combustão para o Grupo 2.

Observa-se, no gráfico da Figura 15, que os briquetes do Grupo 2 apresentaram picos de temperatura em tempos variando dos 9 aos 16 minutos. O briquete de casca de arroz apresentou perda de massa mais lenta e pico de temperatura mais demorado, aos 16 minutos. Comparando-se os gráficos dos dois grupos verifica-se que eles apresentaram curvas semelhantes, porém, a combustão dos briquetes do Grupo 2 foi mais homogênea que a do Grupo 1.

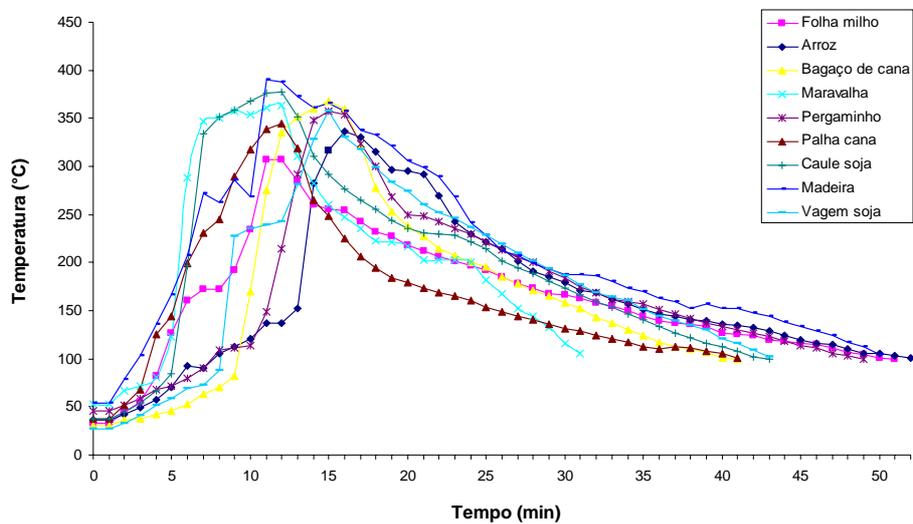


FIGURA 15 Gráfico da temperatura em função do tempo de combustão dos briquetes do Grupo 2.

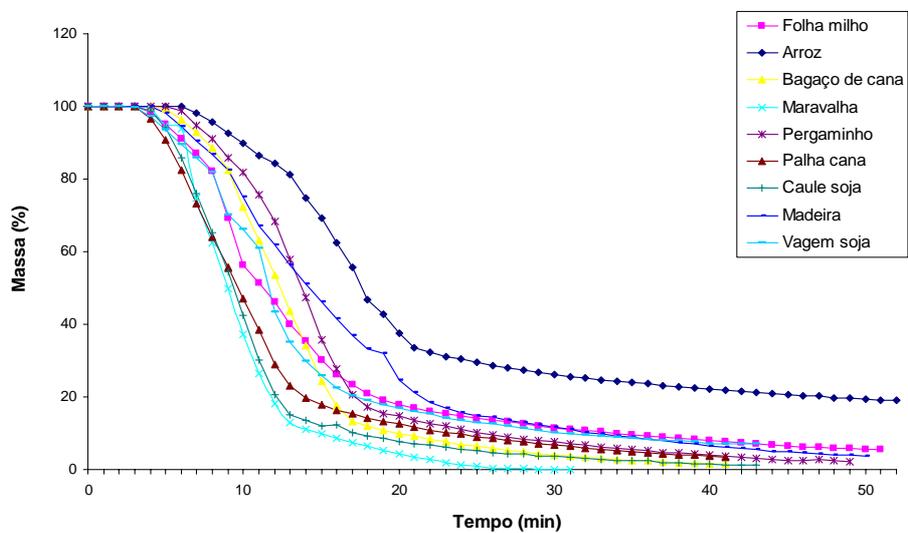


FIGURA 16 Gráfico da massa em função do tempo de combustão dos briquetes do Grupo 2.

O gráfico da Figura 17 mostra a relação funcional entre o ICOM e a densidade aparente dos briquetes. Verifica-se que a relação entre as variáveis foi muito pequena, indicando que o ICOM não sofreu influência da densidade aparente dos briquetes.

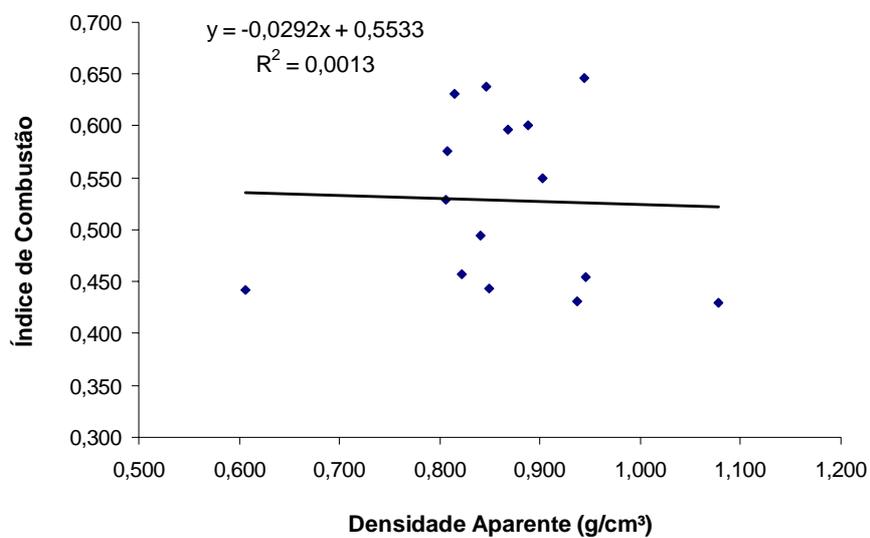


FIGURA 17 Gráfico do ICOM dos briquetes em função da densidade aparente.

Quirino & Brito (1991) testaram briquetes de finos de carvão e encontraram correlação apenas entre o índice de combustão e a densidade a granel.

7 CONCLUSÃO

- ❖ O tempo e a temperatura de prensagem interferiram na resistência mecânica dos briquetes.
- ❖ Para briquetes de serragem, o melhor tempo de briquetagem foi de oito minutos.
- ❖ A casca de arroz e o pergaminho do café não briquetaram somente com pressão, sem utilização de temperatura.
- ❖ A temperatura de melhor desempenho foi de 125°C para briquetes produzidos a partir de pergaminho do café e casca de arroz.
- ❖ Encontrou-se correlação entre resistência à compressão e densidade aparente dos briquetes igual a 0,54 e entre o índice de combustão, e a densidade aparente a correlação foi praticamente nula.
- ❖ Os briquetes de casca de arroz apresentaram qualidade superior, devido à sua maior densidade e alta resistência mecânica.
- ❖ O maior índice de combustão foi encontrado para os briquetes da vagem do feijão.

8 SUGESTÕES

Estudos mais aprofundados devem ser feitos, visando conhecer, em maior detalhe, o processo de briquetagem de resíduos de biomassa vegetal; Possibilitando assim o aproveitamento de um maior volume e variedade de resíduos.

Pesquisas futuras devem ser feitas na tentativa de otimizar o tempo e a temperatura de briquetagem para cada resíduo especificamente, estudar a viabilidade da mistura de resíduos lignocelulósicos e a torrificação destes antes da briquetagem.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES JÚNIOR, F.T.; SANTOS, G.A. Potencial de geração de biomassa para briquetagem e o perfil do mercado consumidor deste insumo na região do Cariri-CE. In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS FLORESTAIS, 2.; SEMINÁRIO EM TECNOLOGIA DA MADEIRAS E PRODUTOS FLORESTAIS NÃO-MADEIRÁVEIS, 1., 2002, Curitiba. **Anais...** Curitiba: FUPEF, 2002. 1 CD-ROM.

BROSCH, C.D.; FURUNO, J.K. Aproveitamento dos finos de carvão vegetal: divisão de metalurgia do IPT: contribuição técnica número 748. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 22., 1968, Vitória. **Anais...** Vitória: ABM, 1968. p.2.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA.

Aproveitamento energético de resíduos de madeira e florestais na forma de briquetes. Disponível em:

<http://infoener.iee.usp.br/scripts/biomassa/br_briquete.asp>. Acesso em: 23 out. 2009.

FONTES, P.J.P. de; QUIRINO, W.F.; PASTORE JUNIOR, F.; FILGUEIRAS, S.M.S. **Aglutinante para briquetagem de carvão vegetal.** Brasília: DPQ/IBDF, 1984. Não paginado.

GESTÃO de resíduos sólidos na indústria madeireira. **Revista da Madeira**, São Paulo, n.77, nov. 2003. Disponível em:

<http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=467&subject=Res%EDduos&title=Gest%E3o%20de%20res%EDduos%20s%F3lidos%20na%20ind%FAstria%20madeireira>. Acesso em: 22 out. 2009.

LUCENA, D.A.; MEDEIROS, R.D.; FONSECA, U.T.; ASSIS, P.S. Aglomeração de moinha de carvão vegetal e sua possível aplicação em alto-forno e geração de energia. **Revista Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v.4, n.2, p.1-6, abr./jun. 2008.

ORMOND, J.G.P. **Glossário de termos usados em atividades agropecuárias, florestais e ciências ambientais.** 3.ed. Rio de Janeiro: BNDES, 2006. 54p.

QUIRINO, W.F. **Briquetagem de resíduos lignocelulósicos**. Brasília: LPF/IBAMA, 1991. 8p. (Circular Técnica, 2).

QUIRINO, W.F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. Brasília: LPF/IBAMA, 2003. 14p.

QUIRINO, W.F.; BRITO, J.O. **Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal**. Brasília: LPF/IBAMA, 1991. 18p. (Série Técnica, 13).

SALEME, J.E.F. **Estudo básico para briquetagem do carvão vegetal**. Ouro Preto: Escola de Minas e Metalurgia, 1992. 19p.

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

SERVIÇO BRASILEIRO DE RESPOSTAS TÉCNICAS. **Briquetes**. Brasília, 2007. Disponível em: <<http://www.sbrt.ibict.br>>. Acesso em: 26 set. 2008.