

UFRRJ
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS E FLORESTAIS

DISSERTAÇÃO

**Utilização dos resíduos do processamento de teca (*Tectona grandis* L.f.)
na produção de briquetes**

Cléo Carvalho Ohana

2012



UFRRJ
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E
FLORESTAIS

UTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO DE TECA
(*Tectona grandis* L.F.) NA PRODUÇÃO DE BRIQUETES

CLÉO CARVALHO OHANA

Sob a Orientação do Professor
Alexandre Monteiro de Carvalho

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **mestre em Ciências, no curso de pós-graduação em Ciências Ambientais e Florestais**, área de concentração Tecnologia de Produtos Florestais.

Seropédica, RJ
Junho de 2012

662.74

O36u

T

Ohana, Cléo Carvalho, 1986-

Utilização dos resíduos do processamento de teca jovem (*Tectona grandis* L.f.) na produção de briquetes / Cléo Carvalho Ohana - 2012.

52 f.: il.

Orientador: Alexandre Monteiro de Carvalho.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais.

Bibliografia: f. 39-45.

1. Briquetes (Combustível) - Teses. 2. Briquetes (Combustível) - Análise - Teses. 3. Resíduos vegetais - Reaproveitamento - Teses. 4. Teca (Árvore) - Teses. I. Carvalho, Alexandre Monteiro de, 1971-. II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais. III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E FLORESTAIS

CLÉO CARVALHO OHANA

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 28/06/2012



Alexandre Monteiro de Carvalho, Prof. Dr. UFRRJ
(Orientador)



Fabio Minoru Yamaji, Prof. Dr. UFSCar



João Vicente de Figueiredo Latorraca, Prof. Dr. UFRRJ

Para ti dedico somente minha essência.
Dedico meus títulos somente para quem
achar mais importante ter do que ser.

AGRADECIMENTOS

Ao grande Leão de Judá e ao divino universo pelas linhas mestras de iluminação e proteção.

À minha família, a minha amada mãe e ao meu querido Baré, por estarem sempre incentivando minhas ideias, respeitando e aceitando minha ausência.

Ao meu querido orientador professor Alexandre Monteiro de Carvalho pela consideração e confiança, pela ajuda no meu desenvolvimento profissional, pelos conselhos e pela atenção, e pelo seu grande exemplo pessoal e profissional de viver a Engenharia Florestal com competência, sem nunca perder sua ternura, humanidade e paciência. À minha grande amiga-irmã Lydiane Lúcia de Souza Bastos pelo incentivo e pela coragem de me acompanhar nesta jornada.

Ao professor Edvã Oliveira Brito que me ajudou como um verdadeiro pai, me dando abrigo, alimento e lições preciosas quando cheguei a Seropédica apenas com uma mochila nas costas e força de vontade.

Ao professor Alexandre Miguel pelo companheirismo e pelas essenciais dicas de sobrevivência na pós-graduação.

A todos os funcionários e estagiários do Laboratório de Processamento da Madeira, por toda a boa vontade em ajudar em toda e qualquer necessidade para realização deste trabalho.

Aos demais professores e funcionários do Instituto de Florestas que contribuíram com a complementação da minha formação.

Aos amigos da turma da pós-graduação Nay, Jú, Xú, Alho, Cintia, Elaine, Charles, Michel, Veralú, Leandro, Shana, Paty Sierra, “Babús da conservação” e demais colegas de turma. Tenho orgulho por ter compartilhado momentos de estudo e também de descontração com todos vocês.

Aos tantos queridos amigos que criei em Seropédica, em particular à Nayara Dorigon, Ricardo Lage, André Flores, Mafalda Flores, Monique Lima, Diogo Kanuté, Inês Rosa Bueno, Mazinho, D. Amélia, e toda a turma do MB1 que me proporcionaram momentos inesquecíveis neste lugar.

Ao Prof. Dr. Fábio Minoru Yamaji e a toda a equipe da UFSCar-Sorocaba, por toda ajuda prestada no desenvolvimento deste trabalho, abrindo as portas desta instituição para a realização de grande parte desta pesquisa.

A minha querida amiga de quatro patas Carmina Burana, minha maior companheira de todos os momentos durante o tempo do mestrado.

Peço perdão se não mencionei todas as pessoas que passaram de alguma forma na minha vida durante este tempo, seriam tantas que este se tornaria um trabalho quase que impraticável, pois qualquer encontro na vida tem um significado especial. Obrigado a todos.

BIOGRAFIA

CLÉO CARVALHO OHANA, filha de Moisés Leão Ohana e Ivocleide Gomes de Carvalho, nasceu em Manaus-Am, aos sete dias de março do ano de 1986.

Ingressou na Universidade Federal do Amazonas, onde se graduou em 2009 obtendo o título de Engenheira Florestal.

Iniciou em março de 2010, o curso de Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

RESUMO

OHANA, Cléo Carvalho. **Utilização de resíduos do processamento de teca (*Tectona grandis* L.f.) na produção de briquetes.** 2012. 63f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Departamento de Produtos Florestais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2012.

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a viabilidade de produção de briquetes fabricados a partir de resíduos do processamento de teca (*Tectona grandis* L.f.). Teve ainda como objetivos específicos verificar o efeito do tipo de resíduo, a granulometria e o teor de umidade ideal para a fabricação de briquetes de boa qualidade, e indicar finalidades de utilização para os briquetes produzidos.

As propriedades analisadas nos briquetes foram densidade, umidade, granulometria, poder calorífico, teor de cinzas, teor de extrativos, expansão dimensional e resistência mecânica. Um experimento fatorial composto por dois tipos de resíduos da usinagem da teca (serragem e cascas) e três níveis de umidade (10%, 12%, 15%) foi utilizado. Os resultados encontrados mostraram que a utilização da serragem e da casca de *Tectona grandis* L.f. é viável para a produção de briquetes; a umidade ideal encontrada para a produção dos briquetes foi a de 10%; os briquetes produzidos se mostraram resistentes e estáveis, porém devido a grande quantidade de cinzas não são indicados para uso siderúrgico. As propriedades analisadas apontam que os briquetes produzidos estão dentro de padrões compatíveis para uso doméstico e comercial como padarias, pizzarias, churrasarias, entre outros.

Palavras-chave: Briquete, caracterização físico-química, resíduos madeireiros.

ABSTRACT

OHANA, Cléo Carvalho. **Application of teak (*Tectona grandis* L.f.) processing residues at briquettes production.** 2012. 63 f. Dissertation (Master Science in Environmental and Forestry Science). Instituto de Florestas. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, RJ, 2012.

Briquetting is an effective way to utilize the biomass residues for energy purposes. The objectives of this research were to characterize the briquettes produced from the waste processing of young teak (*Tectona grandis* L.f.). The properties analyzed in briquettes were density, calorific value, ash content, extractive content and dimensional expansion. It was used a factorial experiment composed of two types of waste of young teak (sawdust and bark) and three moisture levels (10%, 12%, 15%). The found results showed that the use of the residues of *Tectona grandis* L.f. it is viable for the briquettes production; the ideal moisture found for the production of the briquettes was 10%; the analyzed properties aim that the produced briquettes is compatible patterns for domestic and commercial use, due to great amount of ashes the use of the briquettes is not indicated for metallurgy; the produced briquettes showed resistant and stable, therefore is worth to consider the development of new researches that develop processes that generate smaller amount of ashes so that it becomes also viable the use of these residues in the metallurgical industry.

Key words: Briquettes, *Tectona grandis*, residue.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Densidade e poder calorífico de resíduos e briquetes correspondentes.....	13
Tabela 2. Características básicas de briquetes.....	13
Tabela 3. Composição elementar típica de madeira e casca.....	14
Tabela 4. Poder Calorífico Superior de materiais potenciais para briquetagem.....	17
Tabela 5. Granulometria.....	18
Tabela 6. Teor de cinzas da casca e serragem de várias espécies de eucalipto.....	19
Tabela 7. Poder calorífico médio dos briquetes.....	31
Tabela 8. Resultados médios de densidade aparente (g/cm^3) dos briquetes considerando a interação entre os fatores umidade e material.....	32
Tabela 9. Teor de cinzas médio dos briquetes.....	34
Tabela 10. Teor de extrativos médio dos briquetes.....	35
Tabela 11. Resultados médios das cargas máximas de ruptura (kgf) dos briquetes submetidos ao ensaio de tração considerando a interação entre os fatores umidade e material.....	35
Tabela 12. Resultados médios de expansão (%) dos briquetes considerando a interação entre os fatores umidade das partículas e material.....	37

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema dos briquetes produzidos no estudo.....	21
Figura 2. Resíduos da usinagem de <i>Tectona grandis</i> L.f.	22
Figura 3: Moinho de facas tipo Willey.....	22
Figura 4. Jogo de peneiras para classificação granulométrica.....	23
Figura 5. Balança para determinação de umidade.....	24
Figura 6. Prensa hidráulica utilizada na confecção dos briquetes.....	24
Figuras 7. Detalhes dos briquetes produzidos.....	25
Figura 8. Sistema agitador-aquecedor para diluição de extrativos em água.....	25
Figura 9. Carbonização para determinação do teor de cinzas.....	26
Figura 10. Bomba calorimétrica.....	26
Figura 11. Medição do briquete com paquímetro digital.....	27
Figura 12. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	28
Figura 13. Densidade aparente da madeira e briquetes de <i>Tectona grandis</i> L.f. (U=12%).....	32
Figura 14. Densidade aparente dos briquetes (g/cm ³) fabricados com teores de umidade das partículas estabelecidos em 10%, 12% e 15%.....	33
Figura 15. Carga máxima de ruptura (kgf) fabricados com teores de umidade de 10%, 12% e 15%.....	35
Figura 16. Variação dimensional dos briquetes.....	36
Figura 17. Expansão dos briquetes fabricados com teores de umidade de 10%, 12% e 15%.....	37

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1 <i>Tectona grandis</i> L.f.	2
2.1.1 Descrição da espécie.....	2
2.1.2 Propriedades energéticas de <i>Tectona grandis</i> L.f.....	4
2.2 Madeira e energia	5
2.2.1 Desenvolvimento sustentável e o uso energético da madeira	5
2.2.2 Aproveitamento energético de resíduos de madeira.....	7
2.3 Briquetes: alternativa tecnológica para o aproveitamento energético de resíduos de biomassa.....	8
2.3.1 O processo de briquetagem	8
2.3.2 Estado da arte da produção de briquetes	10
2.3.3 Vantagens do uso de briquetes	12
2.3.4 Características importantes para a análise de briquetes.....	13
2.3.4.1 Densidade	15
2.3.4.2 Umidade	16
2.3.4.3 Poder calorífico.....	16
2.3.4.4 Granulometria.....	17
2.3.4.5 Cinzas	18
2.3.4.6 Extrativos.....	19
2.3.4.7 Resistência mecânica.....	20
2.3.4.8 Estabilidade dimensional.....	20
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.1 Material.....	21
3.2 Classificação dos resíduos	21
3.3 Procedimentos de adequação do material para produção de briquetes	22
3.3.1 Moagem.....	22
3.3.2 Granulometria das partículas	23

3.3.3 Ajuste de umidade	23
3.4 Confeção dos briquetes	24
3.5 Análises físico-químicas	25
3.5.1 Determinação do teor de extrativos solúveis em água	25
3.5.2 Determinação do teor de cinzas	26
3.5.3 Análise calorimétrica	26
3.5.4 Ensaio de expansão volumétrica	27
3.5.5 Densidade	27
3.6 Ensaio de resistência mecânica - compressão diametral	28
3.7 Análise estatística	28
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1 Poder calorífico	30
4.2 Densidade	31
4.3 Umidade	32
4.4 Cinzas	33
4.5 Extrativos	34
4.6 Resistência à compressão	34
4.7 Expansão volumétrica	36
5 CONCLUSÕES	37
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
ANEXO	46

1 INTRODUÇÃO

Diante do contexto da sustentabilidade, um dos instrumentos possíveis para a promoção do equilíbrio entre meio ambiente e economia é o investimento em tecnologias capazes de reduzir a produção de resíduos ou que permitam um maior aproveitamento de matéria-prima, já que ao mesmo tempo em que o descarte de materiais causa impactos ambientais, a reutilização destes pode reduzir a pressão exercida ao meio ambiente.

Portanto, estudos referentes ao reaproveitamento de resíduos de processos de produção de bens de consumo são cada vez mais importantes. Além de que, estas atividades tornam-se assim, compatíveis com a lógica de conservação do meio ambiente, agregando valor aos resíduos, que são transformados em novos materiais, sendo uma alternativa economicamente viável às matérias-primas convencionais.

Ao mesmo tempo em que há uma enorme quantidade de resíduos industriais e agrícolas sendo simplesmente descartados gerando problemas ambientais, existe um problema de escala mundial relacionado à questão do esgotamento das tradicionais fontes energéticas não renováveis, ou seja, enquanto a demanda energética cresce, também cresce a oferta de resíduos de produção que poderiam ser utilizados como matéria-prima para a produção de energia.

O aproveitamento de resíduos de biomassa para fins energéticos é vantajoso no sentido de se tratar de uma fonte de energia renovável, alternativa às tradicionais e poluentes fontes fósseis derivadas de petróleo, tendo em vista a crescente população consumidora e o esgotamento das fontes energéticas não renováveis.

A indústria madeireira gera volumes enormes de resíduos no processo de beneficiamento de madeira. Estima-se que 40% a 60% do volume total de uma tora usinada se transformem em resíduo de produção (FAO, 2003). Esta geração de resíduos ocorre nos processos normais ou mesmo antes da madeira ser introduzida no processo propriamente dito, por não estar dentro dos padrões exigidos pelo mercado consumidor, tornando-se resíduo, juntamente com as serragens, maravalhas, costaneiras, aparas, pó de serra, entre outros (PEREIRA JÚNIOR, 2001).

A utilização de resíduos da indústria madeireira pode contribuir na utilização racional dos recursos florestais. Nesse contexto a briquetagem é uma forma eficaz de aproveitar os resíduos de biomassa para fins energéticos, sendo uma alternativa interessante para a reutilização de resíduos madeireiros de pequena granulometria, que podem ser usados em substituição à lenha, carvão vegetal e mineral.

É importante ressaltar que o Brasil é o maior produtor e consumidor mundial de carvão vegetal, tendo seu uso principal na indústria metalúrgica para o processo de produção de ferro-gusa. Boa parte da geração do carvão vegetal no país ainda apresenta baixa tecnologia e inúmeras condições de insalubridade e precariedade de processos. Estas carvoarias causam enormes impactos ambientais e sociais, derrubando florestas e mantendo trabalhadores em condições severas, portanto, o uso de novas alternativas neste processo produtivo, que necessita de biomassas, representaria uma enorme amenização destes impactos.

A utilização de resíduos abundantes para a confecção de briquetes é importante para justificar sua viabilidade econômica. Para estimular a produção em larga escala e tornar a produção de briquetes economicamente viável deve-se considerar a oferta, a concentração e a

disponibilidade sempre constante da matéria prima, e verificar a qualidade energética do material.

O Brasil possui imensos cultivos de florestas plantadas, sendo os principais os de *Eucalyptus* sp e *Pinus* sp. Atualmente outras espécies se destacam, entre elas a teca (*Tectona grandis* L.f.), sendo que esta representa uma cultura em franca expansão no país e já ocupa uma área plantada de aproximadamente 80 mil hectares concentrada, principalmente, no Estado do Mato Grosso (REIS, 2011).

Assim, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar a viabilidade de produção de briquetes fabricados a partir de resíduos do processamento de teca (*Tectona grandis* L.f.) visando a sua utilização energética. E teve ainda como objetivos específicos verificar o efeito do tipo de resíduo na qualidade dos briquetes;

- Determinar o teor de umidade ideal para a fabricação de briquetes de teca;
- Determinar a granulometria ideal das partículas de resíduos para a fabricação de briquetes de teca;
- Indicar finalidades de utilização para os briquetes produzidos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 *Tectona grandis* L.f.

Nos subitens a seguir será feita a caracterização geral da espécie madeireira *Tectona grandis* L.f., assim como foram levantadas e organizadas informações sobre a utilização da madeira para fins energéticos.

2.1.1 Descrição da espécie

O nome *Tectona* significa carpinteiro e é originária da palavra portuguesa teca derivada do grego “tekton”. *Grandis* provém do latim e significa grande ou nobre. Como era muito utilizada por carpinteiros e marceneiros a qualidade da madeira foi relacionada a esses profissionais surgindo então o nome científico *Tectona grandis* L.f., cuja tradução significa “o maior orgulho dos carpinteiros” (TEWARI, 1992).

A teca é uma espécie arbórea de grande porte da família verbanaceae, de fácil cultivo e bastante resistente à pragas e doenças. As árvores atingem até 35 m de altura e, aproximadamente, até 1 metro de DAP (diâmetro a altura do peito). O tronco é reto e revestido por uma casca espessa resistente ao fogo, possui um alburno estreito e claro bem distinto do cerne, cuja cor é marrom viva e brilhante. É uma espécie caducifólia que perde as folhas durante a estação seca. Possui madeira de alta qualidade utilizada principalmente na confecção de móveis finos e na construção naval onde é praticamente insubstituível pelo fato de resistir ao sol, ao calor, ao frio e à água de chuvas e do mar (LORENZI et al., 2003; RONDON NETO et al., 1998).

A madeira de teca é estável e praticamente não empena, também se contrai muito pouco durante a secagem, permitindo que resista à variação de umidade no ambiente, possuindo uma alta durabilidade por conter um preservativo natural, concentrado no cerne, chamado de tectoquinona (IPEF, 2003). A espécie apresenta densidade aparente média de 650 kg/m³ e apresenta boa resistência a esforços de contração, tração e flexão (IPEF 2003).

A resistência e beleza de sua madeira fazem a teca muito procurada para decoração e confecção de móveis finos. Além do efeito decorativo, a madeira de teca é utilizada de muitas outras maneiras, principalmente na construção naval onde é cultivada desde o século XVIII, quando os britânicos demandavam grandes quantidades de madeira para construção de navios. Também é utilizada para laminação e compensados, e até mesmo como lenha e carvão vegetal em sua área de ocorrência natural (IPEF, 2003).

A teca é originária da Ásia, ocorrendo naturalmente nas florestas tropicais situadas entre 10° e 25°N no subcontinente índico e no sudeste asiático, principalmente na Índia, Tailândia, Laos, Camboja, Vietnã e Java (LAMPRECHT, 1990).

As plantações de teca estão presentes em mais de 50 países e duplicaram desde 1950 e estima-se que a produção mundial total de madeira da espécie, em 2009, foi de 4 milhões de metros cúbicos, com expectativa de mais de 20 milhões de metros cúbicos até o ano de 2020 (BEHAGHEL, 1999).

Devido a sua dispersão geográfica e à variedade de ambientes onde ocorre naturalmente, a teca é uma espécie de alta adaptabilidade, com dispersão vertical entre 0 e 1300m acima do nível do mar, ocorrendo em áreas com precipitação anual de 800 a 2500 mm, e temperaturas extremas de 2° a 42°C, porém não resiste à geada (LAMPRECHT 1990).

A espécie se adaptou muito bem no Brasil, onde apresentou rápido crescimento, com ciclos de corte entre 25 e 30 anos, na região de Cáceres no estado do Mato Grosso (MACEDO et al., 2005), fato devido as melhores condições de solo e aos tratamentos silviculturais praticados nas atividades de reflorestamento. O ciclo de rotação da cultura na Ásia gira em torno de 60 e 100 anos (LAMPRECHT, 1990; LORENZI et al., 2003).

A região centro-oeste do Brasil é a que possui maior área plantada de teca (72 mil hectares), devido ao clima mais favorável para a cultura, seguida pela região Norte (5,6 mil hectares) e região Sudeste (2,4 mil hectares). As regiões sul e nordeste não apresentam plantios significativos, pois as condições edafoclimáticas dessas regiões são incompatíveis com a cultura (REIS, 2011).

Apesar de haver vários plantios experimentais com teca em instituições de ensino e pesquisa, o plantio brasileiro mais antigo e expressivo é o que foi implantado em Cáceres/MT, em 1968, pela empresa Cáceres Florestal, que na época testava espécies madeireiras que pudessem impulsionar o reflorestamento daquela região. A teca apresentou boa aptidão ao plantio e respondeu com um rápido crescimento em altura. Outro fator importante para impulsionar o plantio de teca foi o preço dessa madeira no mercado internacional (US\$ 800,00/m³ em tora), superior até mesmo do mogno (US\$ 300,00/m³ em tora) (OOCITES, 2012).

No Brasil, a teca tem sido manejada em ciclos de corte de cerca de 25 anos, enquanto nos demais países de cultivo, esse ciclo varia de 60 a 100 anos, como dito anteriormente. O IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) testou a qualidade da madeira proveniente de Cáceres e garante que as propriedades físicas e mecânicas são semelhantes às madeiras de teca oriundas

do sudeste asiático. Em 1986, a área plantada com teca era de cerca de 10 mil hectares; sendo que até o ano de 2003 o Estado do Mato Grosso já possuía mais de 50 mil ha de plantios (IPEF, 2003).

2.1.2 Propriedades energéticas de *Tectona grandis* L.f.

A madeira de teca já é utilizada como lenha e carvão vegetal em sua área de ocorrência natural (LAMPRECHT, 1990), entretanto ainda são escassos os trabalhos de avaliação de seu potencial energético.

A utilização de resíduos abundantes para a confecção de briquetes é importante para justificar sua viabilidade econômica. Portanto, a utilização de resíduos do processamento da madeira de *Tectona grandis* L.f. possivelmente seja viável, já que a espécie representa atualmente o terceiro maior plantio florestal do país.

A confecção de briquetes de resíduos madeireiros pode funcionar dentro de um plano de aproveitamento de resíduos que não compete com a reciclagem da madeira para outros fins não energéticos, já que é possível produzir briquetes da parte menos nobre do material residual, como a serragem e as cascas da madeira.

As informações obtidas sobre a teca em literatura ainda são escassas em relação a realidade dos plantios brasileiros, pois a maior parte destes tem idade inferior a 25 anos, sendo que a maioria da madeira utilizada no país é oriunda de primeiros desbastes, tendo características peculiares como por exemplo maior quantidade de alburno nas toras e menor densidade.

Arruda et al. (2010) avaliando as propriedades energéticas do carvão vegetal produzido a partir de resíduos de *Tectona grandis* L.f. jovem, de seis anos de idade, com 14% de umidade e 0,65 g/cm³ de densidade, originados de indústrias de painéis no Mato Grosso, obtiveram resultados na composição química imediata do carvão de, 6,44% de teor de umidade, 28,03% de materiais voláteis, 2,48% de teor de cinzas, 69,48% de teor de carbono e rendimento gravimétrico médio de 30,46%. De acordo com os resultados, concluíram que a madeira jovem possui limitação para uso em siderurgias, sendo mais aceitáveis para outros fins energéticos, como por exemplo, o uso doméstico.

Vital et al. (2010) na intenção de avaliar o poder calorífico superior (PCS) da madeira de teca em árvores de 5, 6, 7, 8, 9 e 11 anos de idade, em diferentes tipos de solo, em Santo Antônio do Leverger, no Estado do Mato Grosso, encontraram os melhores resultados de PCS em árvores com 9 e 11 anos de idade plantadas em áreas com latossolo vermelho e latossolo vermelho-amarelo. Nesta pesquisa concluiu-se que a madeira de teca apresenta PCS satisfatório para a utilização de seus resíduos industriais e toras com menor diâmetro na geração de energia renovável, já que o valor médio de PCS foi igual a 4754,66 kcal/kg, valor próximo aos verificados em espécies normalmente utilizadas para a obtenção de energia: 4790 kcal/kg em *Eucalyptus grandis* (JARA, 1989 *apud* VITAL et al., 2010), 4588,67 kcal/kg em *Eucalyptus urophylla* e 4650,50 kcal/kg em *Eucalyptus urophylla* (QUIRINO et al., 2004 *apud* VITAL et al., 2010).

Ainda não é possível afirmar que a idade de um indivíduo de teca seria o fator determinante para o incremento na densidade da madeira e conseqüentemente na quantidade de

poder calorífico. Pérez & Kanninen (2004) estudaram o efeito do diâmetro da tora nas propriedades da madeira e na quantidade de cerne de teça, em um plantio no nordeste da Costa Rica e verificaram que indivíduos de maior densidade possuem maior quantidade de cerne (25% à 30% do volume total), porém encontraram valores de maior ($>0,65 \text{ g/cm}^3$) e menor densidade ($<0,50 \text{ g/cm}^3$) tanto em indivíduos de diâmetro pequeno, quanto em indivíduos de diâmetro grande.

2.2 Madeira e energia

Nos subitens a seguir são feitas considerações sobre o uso da madeira para a geração de energia, dentro da temática do desenvolvimento sustentável, considerando os rumos do setor energético e a alternativa de reaproveitamento de madeira para fins energéticos.

2.2.1 Desenvolvimento sustentável e o uso energético da madeira

O desenvolvimento sustentável representa a ideia de um modelo econômico capaz de gerar riqueza e bem estar, enquanto promove a coesão social e impede a destruição da natureza. Esse modelo busca satisfazer as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades, utilizando recursos naturais sem comprometer sua produção e fazendo proveito da natureza sem devastá-la buscando a melhoria da qualidade de vida (GAGLIARDI, 2007).

Na maioria das vezes o termo desenvolvimento é designado como sinônimo de crescimento econômico, o qual depende do consumo crescente de energia e recursos naturais. Esse tipo de desenvolvimento tende a ser insustentável, pois leva ao esgotamento dos recursos naturais dos quais a humanidade depende.

O desenvolvimento econômico é essencial para os países mais pobres, mas o caminho a seguir não pode ser o mesmo adotado pelos países industrializados, pois isso significaria a falência dos recursos naturais. Segundo informações do WWF (2012) os países desenvolvidos do Hemisfério Norte embora possuam apenas um quinto da população do planeta, detêm quatro quintos dos rendimentos mundiais e consomem 70% da energia, 75% dos metais e 85% da produção de madeira mundial. Caso os países em desenvolvimento continuem copiando os padrões das sociedades desenvolvidas, a quantidade de combustíveis fósseis consumida atualmente aumentaria 10 vezes, e a de recursos minerais 200 vezes, o que provocaria um caos ambiental e climático sem precedentes.

Nesse contexto a temática relacionada ao aquecimento global já deixou de pertencer exclusivamente à esfera científica e passou a ter forte impacto na política e economia mundial. Reduzir as emissões de carbono implica na redução da geração de eletricidade, energia esta que move a indústria. Em países com matriz energética calcada em derivados fósseis, a escassez deste recurso provoca a diminuição da geração de energia elétrica, implicando diretamente na redução da produção industrial.

A crescente preocupação sobre o aumento da segurança no fornecimento de energia, impulsionado por fatores ambientais e sociais que visam a redução da dependência de

combustíveis fósseis, contribui para despertar o interesse de todo o planeta por soluções sustentáveis, por meio da geração de energia oriunda de fontes limpas e renováveis.

O setor de energia no Brasil é bastante fortalecido por fontes renováveis. Em 2007, as usinas hidrelétricas respondiam por 85,6% da geração de energia elétrica no país. Além disso, a bioenergia está se tornando cada vez mais importante, tanto para a geração de eletricidade como para a produção de biocombustíveis. Porém, a disponibilidade e a confiabilidade de tais fontes dependem de condições climáticas, que podem sofrer alterações em consequência da mudança no clima global relacionada à emissão de gases do efeito estufa. O planejamento energético de longo prazo, no Brasil, ainda não leva em consideração os potenciais impactos das mudanças climáticas no sistema energético brasileiro (PUENTES,2010).

A crise energética da última década tem elevado o custo do petróleo e impulsionado o desenvolvimento de novas tecnologias de pirólise, tendo em vista utilizações mais sofisticadas para o carvão e a lenha. Calcula-se que 60% de toda a madeira abatida nas florestas da Terra seja consumida como combustível, quer de forma direta ou de forma indireta após a sua conversão em carvão. Estima-se que cerca de 25% do total de madeira abatida se destina a fabricação de carvão, ou seja, cerca de 400 milhões de m³/ano (SARDINHA, 2008).

O Balanço Energético Nacional de 2011, tendo o ano base de 2010, afirma que uso do carvão para geração de eletricidade em 2010 cresceu 28,3% em relação ao ano anterior. Já o consumo industrial de carvão metalúrgico, integralmente importado, teve crescimento de 23,2% em 2010 devido à recuperação da siderurgia nacional, que registrou aumento de 23,8% na produção de aço bruto. Na geração elétrica o carvão utilizado é o carvão vapor ou carvão térmico (que tem a finalidade de produzir vapor), de origem nacional, cujos estados produtores são Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (BEN, 2011).

Conforme Brito (1990), até 1972 a madeira representava a primeira fonte de energia do País. Somente em 1973 é que a sua liderança foi perdida para a energia derivada do petróleo, e somente em 1978 esta foi superada pela hidroeletricidade.

Valle (1995) afirmou que, na década de 1990, a madeira continuava tendo papel importante na matriz energética do Brasil e que, apesar da existência das outras fontes de energia, a lenha era o terceiro material energético primário consumido no país, com um consumo médio de $9,78 \times 10^7$ toneladas/ano.

O anuário estatístico da FAO (2004), entre os anos de 1961 a 2003, mostra que a produção de lenha no Brasil cresce a cada ano que se passa, sendo que em 1961 a produção de lenha foi de 87,9 milhões de metros cúbicos e em 2003 esta produção foi de 135, 5 milhões de metros cúbicos, sem nenhuma queda de produção neste período.

As perspectivas futuras sobre o consumo nacional de energia apontado pelo Ministério de Minas e Energia, considerando uma projeção até o ano de 2030, apontam que o uso de energia renovável será priorizado. Assim, poderá se perceber o crescimento do biodiesel e do etanol, tomando lugar dos combustíveis líquidos derivados do petróleo. Na geração de eletricidade, também crescem as participações de fontes primárias renováveis como eólica e biomassa, e surgirá inclusive o aproveitamento de resíduos urbanos para geração de energia (BRASIL, 2007).

A madeira sempre ofereceu histórica contribuição para o desenvolvimento da humanidade, tendo sido sua primeira fonte de energia, inicialmente empregada para

aquecimento e cocção de alimentos. Ao longo dos tempos, passou a ser utilizada como combustível em diversos processos, para a geração de energia térmica, mecânica e elétrica (BRITO,2007).

O uso da madeira para produção de energia apresenta menores problemas de poluição, quando comparada aos combustíveis fósseis, tendo em vista que ela possui um baixo teor de enxofre (CUNHA, 1989). Além disto, o uso da biomassa tem um outro aspecto ambiental favorável, já que a emissão de CO₂ da queima da biomassa na atmosfera geralmente é compensada pela absorção no plantio da nova biomassa (INGHAM, 1999).

Essas vantagens tornam o uso da madeira para fins energéticos interessante, desde que haja uma caracterização adequada de cada tipo de madeira selecionada, sendo o poder calorífico, o teor de umidade, a densidade e a análise imediata, as propriedades mais importantes para sua utilização como combustível (QUIRINO et al.,2004).

Brito (2007) afirma que o uso da madeira para energia é capaz de diminuir a dependência energética externa, e de trazer uma maior segurança quanto ao suprimento da demanda, algo que muitos dos combustíveis hoje empregados não proporcionam. Além do mais, graças ao seu alto potencial renovável e produtivo, especialmente no Brasil, pode expressar uma matriz energética ambientalmente mais saudável e socialmente mais justa, pois é uma das fontes de energia que possibilitam uma das maiores taxas de geração de emprego por recurso monetário investido.

2.2.2 Aproveitamento energético de resíduos de madeira

Com o interesse sobre o uso de resíduos de biomassa para fins energéticos, surgiram várias propostas referentes ao emprego da biomassa florestal. Neste contexto, houve uma importante reflexão quanto à disponibilidade de fontes de energia no Brasil, onde a madeira tem destaque.

Para traçar o panorama da importância da utilização da madeira para fins energéticos, deve-se em primeiro momento ter a dimensão da quantidade de madeira requerida para esta finalidade. Brito (2007) realiza uma síntese do consumo de madeira no país, e afirma que o volume de madeira atualmente consumido para energia no Brasil é de aproximadamente 220 milhões de metros cúbicos anuais, segundo fontes oficiais ligadas à área de energia (MINISTÉRIO..., 2007a *apud* BRITO, 2007). Também segundo fontes do governo (MINISTÉRIO..., 2007a *apud* BRITO, 2007) e de instituições ligadas a setores de aplicação de madeira no Brasil (SOCIEDADE..., 2007; ASSOCIAÇÃO..., 2007 *apud* BRITO, 2007), o seu consumo anual como matéria prima industrial atinge 142,7 milhões de metros cúbicos, o que inclui a produção de celulose e papel, serraria, chapas e painéis.

A produção florestal gera durante todo o processo, além de bens madeireiros e não madeireiros; cascas, galhos, serragens e lenhas finas. Este material é considerado, muitas vezes, rejeito, e não um subproduto com potencial de uso para outros fins.

Além disso, as indústrias de base florestal, devido à falha de planejamento, agregada a tecnologia rudimentar, desperdiçam boa parte da madeira durante o processamento. Brand et al. (2002) elaborando o fluxograma de uma linha produtiva de uma serraria, obteve os valores de rendimento do desdobro de 34,87%, da secagem de 81,88% e da classificação da madeira de

86,42%, sendo que o rendimento geral representou apenas 38,62% do total da madeira. Esta é geralmente a situação padrão destas empresas, salientando que ocorre um aumento progressivo do desperdício enquanto o mercado apresenta diminuição da oferta de madeira.

A crescente preocupação com a quantidade de resíduos produzidos e o aumento do custo da matéria-prima, aliados ao desenvolvimento de tecnologia, viabilizam o aproveitamento e reciclagem cada vez maior dos resíduos, promovendo economia de recursos naturais, diminuição da poluição ambiental, geração de empregos e redução do volume de material a ser descartado.

As opções de uso destes resíduos são as mais variadas possíveis, como a confecção de pequenos objetos de madeira e outros produtos como caixotes e cabos de vassoura. Também existem finalidades mais complexas, como a utilização do rolo-resto de processos de laminação, para construção de casas e de serragem para a confecção de painéis. A potencialidade energética desses materiais também entra nesse contexto, com o desenvolvimento de produtos alternativos para este fim como pellets e briquetes.

2.3 Briquetes: alternativa tecnológica para o aproveitamento energético de resíduos de biomassa

Nos subitens a seguir serão apresentadas informações sobre os chamados briquetes, que na maioria das vezes são constituídos de blocos cilíndricos de material compactado, de alta densidade, composto por resíduos de madeiras ou outras matérias-primas. Serão descritos o processo de fabricação, um breve histórico sobre a utilização e estudo desse produto, as suas vantagens e as suas características importantes para a análise da qualidade.

2.3.1 O processo de briquetagem

A briquetagem é um processo de aglomeração e densificação de pequenas partículas de materiais sólidos em blocos de formas definidas e de maior tamanho. Por meio desse processo, os finos de materiais diversos, subprodutos do beneficiamento industrial, são convertidos em produtos de maior valor comercial (MOTTER et al., 1979). Os tipos mais comuns de briquetes são os produzidos a partir de finos de carvão e os produzidos a partir de biomassa (FURTADO et al., 2010).

Na busca pelo aproveitamento dos resíduos gerados desde a produção florestal até os processos de transformação industrial da biomassa, desenvolveu-se o processo da briquetagem. A aglomeração de partículas de madeira facilita as operações de manuseio do material combustível, além de concentrar a energia disponível em termos de volume.

O processo de fabricação de briquete ocorre por meio da compactação de resíduo no qual é destruída a elasticidade natural das fibras do mesmo. Esta destruição pode ser realizada por dois processos, que são o de alta pressão ou o de alta temperatura. Este último provoca a "plastificação" da lignina, que atua como elemento aglomerante das partículas dos resíduos ligno-celulósicos, uma razão muito importante da não necessidade de adicionar produtos aglomerantes como resinas, ceras, dentre outros. Para que esta aglomeração tenha sucesso,

necessita da presença de certa quantidade de água, compreendida entre 8 a 15% em relação ao peso das partículas, e que o tamanho da partícula esteja entre 5 a 10 mm (BIOMAX, 2009; BIOMACHINE, 2009).

De acordo com Quirino (1991) o resíduo muito seco e o acima da umidade indicada, prejudicam o empacotamento do material ou produzem um briquete sem estabilidade, desfazendo-se quando estocado ou transportado. Ainda segundo Quirino (1991) a briquetagem é uma forma bastante eficiente para concentrar a energia disponível da biomassa, pois 1m³ de briquetes contém de duas a cinco vezes mais energia que 1m³ de resíduos, isso levando em consideração a densidade a granel e o poder calorífico médio desses materiais.

O briquete pode ser utilizado para queima como lenha, gerando calor ou vapor, a exemplo de termoelétricas para produção e comercialização de energia elétrica e queimadores de partículas como ocorre na indústria de cerâmica, dentre outros.

O briquete é uma alternativa à lenha e carvão convencionalmente utilizados. A briquetagem é uma forma eficaz de aproveitar os resíduos de biomassa (SUAREZ, 2003), entretanto, constata-se que os briquetes de biomassa ainda não são amplamente comercializados no mercado brasileiro, principalmente para consumo doméstico. Expandir este mercado é um desafio técnico e mercadológico, que deve responder, em primeiro lugar, ao desenvolvimento de briquetes de alto padrão de qualidade.

O mercado de briquetes está em amplo crescimento, tendo em vista os altos preços dos combustíveis fósseis. Ao substituir a lenha por briquete, os consumidores estão utilizando com muita eficácia, a energia gerada a partir de biomassa e colaborando com a utilização racional de recursos ambientais.

A confecção de briquetes de resíduos madeireiros pode funcionar dentro de um plano de aproveitamento de resíduos que não compete com a reciclagem da madeira para outros fins não energéticos, já que é possível produzir briquetes da parte menos nobre do material residual como a serragem e as cascas da madeira.

Todo resíduo de origem vegetal pode ser compactado pela briquetagem, bastando atender às necessidades de granulometria e teor de umidade exigido pelo processo. Esse processo possui a vantagem de transformar um resíduo de baixíssima densidade em uma lenha de alta qualidade.

2.3.2 Estado da arte da produção de briquetes

A aglomeração manual de finos de alguns materiais já era conhecida desde os tempos remotos na China e na Inglaterra, naquela época utilizavam ligantes de origem mineral, vegetal e até mesmo animal para formação dos briquetes (FONTES et al., 1989).

O mesmo autor afirma que a fabricação comercial e mecanizada de briquetes teve início na França em 1842, com Marsais, que utilizou finos de carvão mineral como matéria-prima. Até a época da 2ª Guerra Mundial foram produzidas grandes quantidades desse produto, principalmente na Europa. Os briquetes eram basicamente usados como combustível em fornos e caldeiras. Com o aumento da produção de petróleo e a redução de seu preço, essa atividade decaiu, juntamente com o uso de combustíveis sólidos.

Em 1915 foi construída uma fábrica em Kingsport (Tennessee/USA) para produzir metanol por meio da destilação da madeira. Os finos de carvão vegetal, subproduto do processo, eram briquetados com o uso do alcatrão da madeira como ligante, que também era um resíduo do processo de destilação (ULHOA et al., 1985).

Outra usina de briquetagem foi construída muitos anos depois pela Ford Motor Company, em Iron Mountain-Michigan, com um fluxograma de produção totalmente modificado e aperfeiçoado. A matéria-prima eram aparas de madeira usadas na estrutura das carrocerias dos caminhões fabricados pela empresa. As aparas eram carbonizadas em fornos rotativos e o carvão produzido era moído posteriormente. O ligante utilizado era constituído de uma mistura de água e amido, e os briquetes eram secos em forno-túnel e depois resfriados. Apesar de a madeira deixar de ser utilizada pela indústria automobilística, o processo básico sobreviveu (ROMAN, 1996).

Nesse contexto, a briquetagem destacou-se como método adequado ao processamento desses materiais e tornou-se a metodologia pioneira de aglomeração. A primeira patente relacionada a briquetagem foi cedida a William Easby, em 1848. O processo desenvolvido por Easby possibilitava a formação de aglomerados sólidos, de tamanho e forma variados, a partir de frações finas de qualquer tipo de carvão, por meio da pressão exercida sobre esse material. Por esse processo, materiais de pequeno ou quase nenhum valor agregado podiam ser transformados em um produto de elevado valor combustível para máquinas a vapor, fornos industriais, culinária e outras aplicações, permitindo recuperar grande parte dos finos considerados rejeitos do processo de beneficiamento de carvão (FONTES et al., 1989).

A briquetagem é hoje um processo já bastante conhecido no exterior, principalmente nos Estados Unidos e Europa. Apesar de ser o maior produtor e consumidor de carvão vegetal do mundo, o Brasil não possui tradição industrial na produção de briquetes contando com indústrias isoladas que praticam a técnica, e possuindo pesquisas científicas sobre o assunto que são relativamente recentes.

Um dos primeiros estudos sobre briquetagem no país foi o de Brosch e Furuno (1968), da Divisão de Metalurgia do IPT - Escola Politécnica da USP, os autores realizaram pesquisa sobre a aglomeração de moinha de carvão vegetal. Dentre os parâmetros estudados estavam: análise granulométrica dos finos de carvão vegetal, separação hidrogravimétrica desses finos, composição de misturas de carvão vegetal com melaço e carvão mineral nas proporções de 10 a 15% de melaço e 25 a 60% de carvão mineral, pressão de briquetagem variando de 55,70 e 85kg/cm², secagem dos briquetes com posterior determinação da resistência à compressão e comportamento dos briquetes a temperaturas elevadas quando em combustão e sujeitos à carga de compressão. O trabalho conclui que a separação hidrogravimétrica da moinha permite enriquecimento da mesma, reduzindo a percentagem de cinzas e impurezas. Em relação ao briquete, afirmaram que o carvão metalúrgico nacional, em conjunto com o carvão vegetal, produz briquetes de boa resistência mecânica e tem bom comportamento durante a queima.

Atualmente os trabalhos científicos nacionais mais consistentes sobre o estudo de energia e briquetes, pertencem ao grupo de pesquisa em energia da madeira, da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), com 185 contribuições de produção bibliográfica nesta temática, registradas no diretório CNPq/Lattes (consulta realizada em junho de 2012).

Também se destacam no cenário nacional atual as pesquisas sobre briquetagem de carvão vegetal e de resíduos vegetais da equipe do Laboratório de Produtos Florestais, do Ministério de Meio Ambiente, em Brasília.

Em relação à produção de briquetes para uso doméstico, tanto em escala de laboratório como em escalas piloto ou industrial, pouco se tem desenvolvido no país mesmo sendo esta a principal utilização dos briquetes de carvão produzidos no exterior, com mercado mundial estimado em 1,5 milhão de toneladas/ano. A produção brasileira resume-se, hoje, a atividades pioneiras e isoladas de pequenos produtores, que apesar de possuírem mérito em geral não conseguem obter a qualidade exigida pelo mercado consumidor, não atingindo também os níveis de produção e comercialização encontrados em outros países.

O processo utilizado atualmente no exterior para a produção de briquetes de uso doméstico divide-se em: moagem e classificação do material, mistura do aglutinante e água, prensagem, secagem, embalagem e estocagem. Os equipamentos básicos são constituídos de: moinho de martelo, misturador com eixos de pás horizontais, prensa de rolos cilíndricos giratórios com capacidade variando de 0,5 a 5 toneladas/hora, forno de secagem contínua, silos de estocagem e empacotador/dosador automático. O aglutinante mais usado na produção destes briquetes é o amido industrial de milho não-refinado, sendo que o briquete contém normalmente 85% de carvão, 6 a 10% de aglutinante (amido) e 5 a 8% de umidade. Os briquetes apresentam, geralmente, uma forma quadrada com os cantos arredondados, volume de aproximadamente 30 cm³ e densidade na faixa de 0,4 a 0,7g/cm³ (QUIRINO, 1991).

Existe uma série de fatores que impediu o desenvolvimento da produção em larga escala de briquetes no Brasil, dentre eles pode-se citar o consumo de carvão vegetal ser quase que exclusivo na siderurgia e esta ser uma matéria-prima abundante e de baixo custo. O baixo preço pago pelo carvão vegetal a granel, torna economicamente inviável qualquer investimento em briquetagem.

Entretanto, acredita-se que o briquete possa atender tanto ao mercado externo como ao futuro mercado interno, a preços competitivos, desde que se desenvolva o processo de briquetagem com equipamentos nacionais, matéria-prima e aglutinantes economicamente viáveis, sendo estes dois últimos os principais responsáveis pelo custo de produção do briquete.

Brito (1991), afirma que no Brasil, o interesse da pesquisa com briquetagem sempre esteve voltado para o aproveitamento dos finos de carvão vegetal oriundos da siderurgia, levando a maioria das pesquisas para o desenvolvimento de briquetes para usos nessa atividade. A atividade industrial e comercial do briquete doméstico no Brasil está sendo iniciada por pequenas empresas, sem capacidade para investimentos em pesquisas, justificando-se possivelmente aí, a baixa e a grande variedade de qualidade dos briquetes.

2.3.3 Vantagens do uso de briquetes

Os briquetes são fabricados para atender os estabelecimentos e indústrias que possuam fornalhas, fornos, caldeiras e que utilizam lenha para gerar energia; eles substituem com vantagem a lenha à medida que reduz custos, facilita o transporte, a manipulação e o armazenamento. Seu formato cilíndrico padronizado reúne uma alta densidade de resíduos prensada, sem a adição de produtos químicos ou aglutinantes, com alto poder calorífico. Os

briquetes contribuem para o controle do desmatamento e da poluição já que uma grande quantidade de resíduo que seria descartado pode ser aproveitada (FIEC, 2003).

De acordo com os dados relatados no trabalho de Silveira (2008), as principais vantagens do uso de briquetes em relação a lenha são:

- Devido a baixa umidade a temperatura se eleva rapidamente, produzindo menos fumaça, cinza e fuligem;
- Maior temperatura de chama e queima regular;
- Não danifica a fornalha no manuseio de abastecimento;
- Menor manutenção das grelhas e fornalhas;
- Menor custo;
- São fornecidos em embalagens padronizadas;
- Produto 100% reciclado e ecológico;
- Menor necessidade de estoque, já que o produto é seco e pronto para o uso;
- Maior higiene e melhor aparência, ideal para indústria alimentícia;
- Formato geométrico que facilita o transporte, manipulação e armazenamento;
- Redução do impacto, principalmente sobre as florestas nativas, para retirada da lenha;
- Menor índice de poluição, pois se trata de um combustível renovável;
- Não há necessidade de regulamentação ambiental pelos órgãos federal, estadual e municipal;
- Menor espaço para armazenamento;
- Permite o aproveitamento de resíduos das indústrias de base florestal, agro-agrícolas, agro-alimentares, dentre outras de origem vegetal;
- Maior densidade;
- Maior poder calorífico.

Quirino (2002) afirma que através do processo da briquetagem pode-se transformar qualquer resíduo de baixa densidade, ou seja, com baixo poder calorífico em uma “lenha” de alta qualidade energética, bastando atender os padrões de granulometria e umidade para o processo. A Tabela 1 mostra a densidade e o poder calorífico dos resíduos e dos briquetes correspondentes.

Tabela 1. Densidade e poder calorífico de resíduos e briquetes correspondentes:

Tipo de resíduo	Densidade natural do resíduo (kg/m³)	Densidade de um briquete (kg/m³)	Densidade à granel do briquete (kg/m³)	Poder calorífico (kcal/kg)
Palha de milho	33	910	550	3570
Pó de serra	274	1220	570	4880
Aparas de madeira	112	1160	565-615	4800
Usina de compensado	132	830	560	4424
Casca de arroz	150	1280	610	3730
Bagaço-de-cana	180	1100	500-600	3700

Fonte: Quirino, 2002

2.3.4 Características importantes para a análise de briquetes

As características elementares dos briquetes não variam muito entre resíduos de compostos orgânicos. A Tabela 2 relaciona as características ideais desejáveis em briquetes siderúrgicos.

Tabela 2. Características básicas de briquetes:

Características	Umidade	Carbono fixo	Cinzas	Materiais Voláteis	Poder Calorífico	Densidade
	%	%	%	%	kcal/kg	kg/m ³
Valor	10 à 12	13,60	2	84,40	4300 a 5.000	1000 a 1300

Fonte: Silveira 2008, adaptado Biomachine, 2007

Quirino (1991) analisando as características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal caracterizou-os analisando a umidade, teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, poder calorífico, densidade, porosidade, friabilidade e resistência à compressão. Através destas propriedades pode-se verificar a influência das mesmas sobre seus desempenhos quando submetidos ao processo de combustão.

Segundo Silveira & Campos *apud* Quirino 1991, tanto a porosidade como a solidez e a resistência de um carvão vegetal dependem das condições sob as quais foi feita a carbonização. Isto justifica o estudo das conseqüentes modificações que podem ocorrer em briquetes submetidos a tratamentos térmicos durante ou após a secagem. O autor também considerou o estudo do poder adsorvente e absorvente das partículas do carvão vegetal, ou seja, a química de superfície, juntamente com o estudo da estrutura do pó do carvão, que permite determinar a relação pasta ligante/esqueleto granular, visando regular a mistura exata e, possibilitando controlar o fenômeno de “creep” do briquete, que acontece a determinadas temperaturas do tratamento térmico e, também, evitar o trincamento do briquete na ocasião da desmoldagem.

Furtado et al. (2010) definem que as características que qualificam o briquete são o poder calorífico superior (PCS), que indica o potencial de produção de energia por unidade de massa; a densidade, que expressa a quantidade de material por unidade de volume, portanto quanto maior, mais concentrada está a energia, tendo assim um briquete com maior potencial energético em um mesmo volume; e a resistência à compressão, que é um parâmetro para a resistência do briquete durante o transporte e armazenamento.

Dependendo da finalidade de utilização a qualidade do briquete pode ser diferente. Para uso siderúrgico o briquete necessita de alto poder calorífico e carbonização mais demorada quanto possível. Para uso doméstico, a baixa toxidez é a propriedade mais importante, seguida da resistência ao manuseio, facilidade de acendimento, facilidade de transporte e estocagem (QUIRINO, 2002).

A Komarek Research *apud* Quirino (1991), ressalta que os briquetes podem ser avaliados quanto a sua resistência a absorção de umidade, a soluções salinas, podendo ser quantificada a reatividade dos mesmos. Entretanto, testes que avaliam as propriedades mecânicas são usualmente os mais empregados. A resistência à compressão 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 manuseio natural dos briquetes. Todos estes testes medem certos aspectos de qualidade dos briquetes. No entanto, estes resultados devem ser interpretados com cuidado, porque são influenciados pelo tamanho e 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.

Vários autores apontam o poder calorífico, o teor de umidade, a densidade e a análise imediata como as propriedades mais importantes da madeira para sua utilização como combustível (BRITO & BARRICHELO, 1978; JUNGE, 1975; AROLA, 1976; CORDER, 1976 *apud* QUIRINO, 2005a).

É importante salientar que algumas destas propriedades são influenciadas pela composição elementar do material do qual o briquete está sendo fabricado. A Tabela 3 mostra a composição elementar geral da madeira e casca de coníferas e folhosas.

Tabela 3. Composição elementar típica de madeira e casca:

Matéria	Composição Elementar (%)			
	Hidrogênio	Carbono	Nitrogênio	Oxigênio
Coníferas				
(Madeira)	6,3	52,9	0,1	39,7
(Casca)	5,9	53,1	0,2	37,9
Folhosas				
(Madeira)	6,4	50,8	0,4	41,8
(Casca)	6,0	51,2	0,4	37,8

Fonte: Brito & Barrichelo, 1978

Ponderando as informações sobre as propriedades mais importantes para a análise de briquetes, a seguir será dada ênfase para aquelas que foram avaliadas neste estudo.

2.3.4.1 Densidade

A densidade refere-se à quantidade de madeira existente num determinado volume a uma determinada umidade. Devido à madeira ser um material poroso, constituído de uma matriz de fibras e espaços vazios, o valor da densidade depende da inclusão ou não do volume de poros e as determinações da mesma pode ser feita de duas formas. Na primeira determina-se o volume de uma forma global, incluindo o volume de poros e obtendo a densidade aparente. Na segunda, o volume da amostra é determinado sem a inclusão dos poros, obtendo-se o volume real ou densidade da parede celular (VITAL, 1984).

A utilização da densidade se dá devido à mesma ser de fácil determinação e apresentar boa correlação com as características celulares e outras propriedades físicas da madeira. Geralmente, a densidade utilizada é aquela determinada com base na massa de madeira seca em relação ao seu volume saturado (densidade básica). Porém, outro tipo de densidade pode ser utilizado, como é o caso da densidade aparente a 0 e a 12%. Para esse tipo de densidade a massa e o volume encontram-se a um determinado teor de umidade, que pode ser 0% ou 12% (PALERMO, 2011).

A densidade é uma das propriedades físicas mais importantes da madeira, pois dela dependem a maior parte de suas propriedades físicas e tecnológicas, servindo na prática como uma referência para a classificação da madeira, já que a densidade é um reflexo fiel da quantidade de matéria lenhosa por unidade de volume ou, de forma inversa, do volume de espaços vazios existentes na madeira. De modo geral a densidade de madeira está correlacionada com seu valor combustível. Quando a madeira é solicitada para fins energéticos tratamos esta propriedade física como densidade energética, que é a quantidade de energia por unidade de volume de um combustível (QUIRINO, 2002).

Para melhor compreender a densidade energética foi inserido a seguir um exemplo extraído do Manual de Utilização Energética de Resíduos Florestais do IBAMA/LPF (Quirino, 2002):

“Supondo que 1 estéreo (st) de lenha possua 300kg. Conforme o Balanço Energético Nacional (BEN) cada quilo de lenha possui 300kg x 3300 kcal/kg. Portanto 1 st de lenha possui 300kg x 3300 kcal/kg = 990.000 kcal.”

Com relação à densidade, que é definida como a relação entre a massa e o seu volume, informa-se a substância de que é feito um corpo é mais ou menos compacta; no caso específico a densidade da lenha é bem menor do que do briquete, portanto o briquete é mais compacto do que a lenha (BIOMACHINE, 2009)

2.3.4.2 Umidade

No momento da queima a umidade contida na madeira causa uma perda de calor nos gases de combustão em forma de vapores, pois parte da energia da combustão será gasta para evaporar a água, portanto teores de umidade reduzidos são interessantes no uso da madeira para queima. Neste ponto o briquete tem a vantagem de possuir umidade controlada, uniforme e menor quando comparado à lenha comum. O valor de umidade máxima que uma madeira pode ter para entrar em combustão é de 65% a 70% em base úmida. Acima deste limite são necessárias calorias de origem externa para a madeira secar e entrar em combustão (INCE, 1980; CUNHA et al., 1989; JARA, 1989 *apud* QUIRINO 2005b).

Em suma, o teor de umidade da madeira torna-se importante por duas razões básicas: a primeira é que ele varia dentro de faixa ampla de valores em função de espécies, clima, armazenamento, entre outros, tornando o controle do processo de combustão mais difícil. A segunda razão é que a água tem um poder calorífico negativo, isto é, necessita de calor para evaporá-la (BRITO & BARRICHELO, 1979).

Antunes (1982) afirma que a eficiência na modelagem geometricamente uniforme de briquetes está relacionada à umidade da massa a ser briquetada, que deve ter teor de umidade na faixa compreendida entre 10% a 20%, e a temperatura e pressão dos cilindros.

Chrisostomo et. al. (2010) estudaram a influência do teor de umidade na briquetagem apresentando uma análise feita em briquetes de serragem de eucalipto. A granulometria utilizada foi de 40 e 60 mesh e para a produção dos briquetes foram utilizados teores de umidade de 0%, 10%, 20% e 30%. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão mostraram que os briquetes produzidos com teor de umidade de 10% foram os mais resistentes (74,18 kgf/cm³), enquanto os briquetes com 30% de umidade foram considerados os mais frágeis.

Os resíduos briquetados, devido à exigência de possuir baixa umidade e elevada massa específica aparente, são menos higroscópicos e muito mais resistentes ao apodrecimento ou a fermentação do que resíduos em estado natural (BEZZON, 1997).

2.3.4.3 Poder calorífico

O poder calorífico é a quantidade de calor liberadas na combustão completa de uma unidade de massa do combustível. O poder calorífico é expresso em joules por grama ou quilojoules por quilo, e também em calorias por grama ou quilocalorias por quilograma (QUIRINO, 1991).

Uma das mais importantes propriedades do combustível é o poder calorífico do material, um bom carvão ou briquete deverá possuir alto poder calorífico visto que o tempo de queima é diretamente proporcional à energia liberada pelo combustível (QUIRINO, 1991).

O poder calorífico divide-se em superior que é aquele em que a combustão se efetua a volume constante, e no qual a água formada durante a combustão é condensada e o calor que é derivado desta condensação é recuperado e, em inferior, onde é considerada a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível, após deduzir as perdas com a evaporação da água (BRIANE & DOAT, 1985; JARA, 1989 *apud* QUIRINO, 2005a).

A quantidade de poder calorífico é usualmente obtida pela queima de uma quantidade conhecida de combustível, medindo-se o calor libertado. No caso de madeira podem se encontrar valores desde 3000 kcal/kg até 5400 kcal/kg. A resina presente nas espécies florestais tem poder calorífico médio de 9460 kcal/kg e dessa forma as espécies com altos teores de resinas, como as coníferas, apresentam poder calorífico maior que as que apresentam baixos teores de resina como as folhosas (BRITO & BARRICHELO, 1979).

A seguir, na Tabela 4, são apresentados valores de poder calorífico superior de alguns materiais tradicionalmente utilizados para a confecção de briquetes:

Tabela 4. Poder Calorífico Superior de materiais potenciais para briquetagem:

Material	PCS (kcal/kg)
<i>Eucalyptus grandis</i> (madeira)	4500
<i>Eucalyptus grandis</i> (casca)	4189
<i>Pinus sp.</i> (madeira)	4720
<i>Pinus sp.</i> (casca)	5036
Palha de milho	3570
Pó de serra	4880
Casca de arroz	3730
Bagaço de cana	3700

Fonte: Sanchez & Rezende, 2008; Gonçalves 2006; Quirino *et. al.* 2004

2.3.4.4 Granulometria

A qualidade do briquete também está relacionada ao tamanho das partículas que o compõe, pois a granulometria do material influencia diretamente no consumo de aglutinantes, quando é o caso de utilizá-los, e na resistência final do briquete. O grau de moagem considerado correto é o que produz uma quantidade de pó suficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores, evitando a desagregação na prensagem (ANTUNES, 1982).

Quirino (1991) afirma que várias empresas siderúrgicas de Minas Gerais pesquisaram a briquetagem como uma das opções de aproveitamento do expressivo volume de finos gerados no peneiramento do carvão vegetal, quando da seleção de granulometria, antes do carregamento do alto-forno. Segundo Silveira & Campos *apud* Quirino (1991), essa quantidade de volume de finos pode variar em função da qualidade do carvão e da exigência de granulometria mínima característica de cada tipo de equipamento de redução. Esses pesquisadores mostraram sua preocupação na utilização dos finos, discutiram uma série de alternativas, das quais a única que vinha sendo aplicada, na época, era a sinterização de minério de ferro. Uma das opções mencionadas seria a da compactação, usando o briquete como redutor. Ressaltaram que a uniformidade granulométrica do briquete permitiria a distribuição mais uniforme, do fluxo gasoso por meio da carga, e a maior densidade do briquete conduziria a um menor consumo

específico de carbono. O briquete deveria ter, entretanto, uma resistência, quando aquecido e sobre pressão, equivalente às condições de reação de processo no alto-forno.

A análise granulométrica é feita através de peneiras de diferentes aberturas, padronizadas internacionalmente. Cada peneira tem um número de aberturas por polegada linear, denominado “mesh”. Logo, quanto maior o “mesh”, maior o número de aberturas e, conseqüentemente, mais fino será o material peneirado. Assim, para materiais grosseiros, utiliza-se peneiras de baixo “mesh” e para finos utiliza-se peneiras com maior “mesh”. A Tabela 5 ilustra valores em mesh, equivalentes aos valores em escala métrica da abertura da peneira.

Tabela 5. Granulometria:

Peneira (mesh)	abertura (mm)	Peneira (mesh)	abertura (mm)	Peneira (mesh)	abertura (mm)
3,5	5,66	18	1	80	0,177
4	4,76	20	0,84	100	0,149
5	4	25	0,71	120	0,125
6	3,36	30	0,59	140	0,105
7	2,83	35	0,5	170	0,088
8	2,38	40	0,42	200	0,074
10	2	45	0,35	230	0,062
12	1,68	50	0,297	270	0,053
14	1,41	60	0,25	325	0,044
16	1,19	70	0,21	400	0,037

Fonte: ASTM, 1990

Costa et al. (2010) buscando parâmetros que influenciam na formação dos briquetes, estudaram o efeito da granulometria da serragem de Pinus no processo de briquetagem. Dividiram o material em três classes granulométricas: fração retida na malha de 14 mesh, retida na malha de 35 mesh e a fração restante no fundo (< 60 mesh) e obtiveram o resultado de que é possível a fabricação dos briquetes com todas as três diferentes granulometrias, sendo que no teste de resistência mecânica as frações de 14 e 60 mesh apresentaram melhores resultados.

2.3.4.5 Cinzas

A cinza é um material de origem mineral, não orgânica, inerte e não combustível. O teor de cinzas da madeira em relação aos outros elementos que constituem o material madeira é bastante baixo, com geralmente menos que 1% do peso total da madeira. O teor de cinzas da casca é maior que o da madeira. O corte e manuseio das toras de madeira normalmente fazem com que haja incrustações de terra na casca, o que pode resultar também num aumento do teor de cinzas durante a combustão (BRITO & BARRICHELO, 1979).

O teor de carbono fixo e o poder calorífico dependem da quantidade de material orgânico presente no combustível. A resistência de um briquete também aumenta com a diminuição do teor de cinzas (QUIRINO,1991).

Brito (1991) verificou que o teor de cinzas mostra maiores índices de correlação linear com o teor de carbono fixo e com o poder calorífico, sendo ambas as correlações inversas.

Na Tabela 6 é apresentado um exemplo comparativo entre teor de cinzas da casca e da madeira de várias espécies de eucalipto:

Tabela 6. Teor de cinzas da casca e serragem de várias espécies de eucalipto:

Espécie	Material	Teor de Cinzas (%)
<i>E. grandis</i>	Madeira	0,31
	Casca	6,4
<i>E. saligna</i>	Madeira	0,41
	Casca	6,14
<i>E. microcorys</i>	Madeira	0,41
	Casca	1,57
<i>E. tereticornis</i>	Madeira	0,52
	Casca	1,97
<i>E. resinífera</i>	Madeira	0,3
	Casca	1,34
<i>E. cloeziana</i>	Madeira	0,53
	Casca	0,32

Fonte: Brito & Barrichelo, 1978

2.3.4.6 Extrativos

De acordo com Klock & Muniz (1998), Os extrativos da madeira são substâncias não pertencentes à porção estrutural da parede celular ou lamela média, portanto são um tipo de componente acidental da madeira de tipo volátil e solúvel em água e solventes orgânicos neutros. Os extrativos são responsáveis por certas características da madeira como cor, cheiro, gosto, resistência ao apodrecimento e propriedades abrasivas.

As madeiras de coníferas possuem canais resiníferos ou óleos resinas tanto na direção axial quanto na radial. Cerca de 50% da óleo resina de algumas coníferas se constitui de ácidos resinosos, 20 a 30% são monoterpenos voláteis, e o restante, terpenóides e ésteres de ácidos graxos (KLOCK & MUNIZ, 1998).

As resinas de madeiras de folhosas estão localizadas nas células de parênquima do raio que estão conectados com os vasos e são constituídas geralmente por gorduras, ceras e esteróides (KLOCK & MUNIZ,1998).

Durante o aquecimento da madeira, muitos compostos orgânicos voláteis são produzidos e liberados, tais como alcoóis, resinas, terpenos. São eles que participam na reação em cadeia durante o processo de combustão da madeira (MANNINEN et al., 2002).

Rossi et al. (2011) avaliando a influência da remoção dos extrativos da madeira no poder calorífico superior em *Hymenaea courbaril* L. e *Cedrelinga catenaeformis* Ducke chegaram a um valor de redução de Poder Calorífico Superior na ordem de 161,3 kcal/kg para material com extrativos e 40,1 kcal/kg para material sem extrativo, concluindo que os extrativos destas madeiras possuem potencial energético positivo.

Brito (1993) relatou uma variação entre 3550 a 5000 kcal/kg no poder calorífico superior de folhosas. Doat (1977) mostrou que espécies tropicais ricas em lignina e em extrativos solúveis têm elevado poder calorífico.

Portanto, a avaliação do teor de extrativos dos resíduos de briquetagem pode ser um indicativo da qualidade energética dos briquetes.

2.3.4.7 Resistência mecânica

Segundo Protásio et al. (2011), a resistência à compressão diametral deve ser observada, pois caso não atinja valores adequados, podem ocorrer rupturas que provocam a abrasão dos briquetes. A avaliação da resistência mecânica pode ser uma ferramenta para direcionar o produto para o uso doméstico ou industrial.

2.3.4.8 Estabilidade dimensional

Segundo Rezende et al. (1995), o estudo do comportamento das variações dimensionais da madeira é essencial para sua utilização industrial, tanto na construção civil como na confecção de móveis. As relações existentes entre massa específica, umidade, contração volumétrica e expansão da madeira, são de fundamental importância para sua correta utilização.

Informações sobre estabilidade dimensional de briquetes ainda são escassas na literatura, porém, é uma característica que merece ser observada. Após a compactação, briquetes feitos com certos materiais têm a tendência de absorver umidade e incharem a tal ponto que se desintegram.

Segundo Protásio et al. (2011), o comportamento dimensional dos briquetes é uma característica importante, pois está diretamente relacionada à estabilidade e integridade dos briquetes após a produção até o consumidor final.

O mesmo autor ainda ressalta que variações volumétricas elevadas podem contribuir com a diminuição nas propriedades de resistência mecânica, e diminuição da densidade aparente e poder calorífico dos briquetes.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

Os briquetes foram produzidos a partir dos resíduos gerados pelo processamento e usinagem da madeira de *Tectona grandis* L.f.. Nesta pesquisa foi utilizado um lote de madeira serrada de teca jovem, produzido a partir do desdobro de toras da base de árvore abatidas com 11 anos de idade, em uma operação de desbaste de um plantio da espécie localizado no município de Cáceres/MT, dentro do Campus do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Cáceres/MT.

A partir da coleta dos resíduos do processamento e usinagem das tábuas, realizados no Laboratório de Processamento de Madeira, do Instituto de Florestas, da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, foram fabricados seis tipos de briquetes, a partir de dois tipos de materiais coletados separadamente (casca e serragem) e três teores de umidade do material (10%,12%,15%) conforme ilustrado na Figura 1.

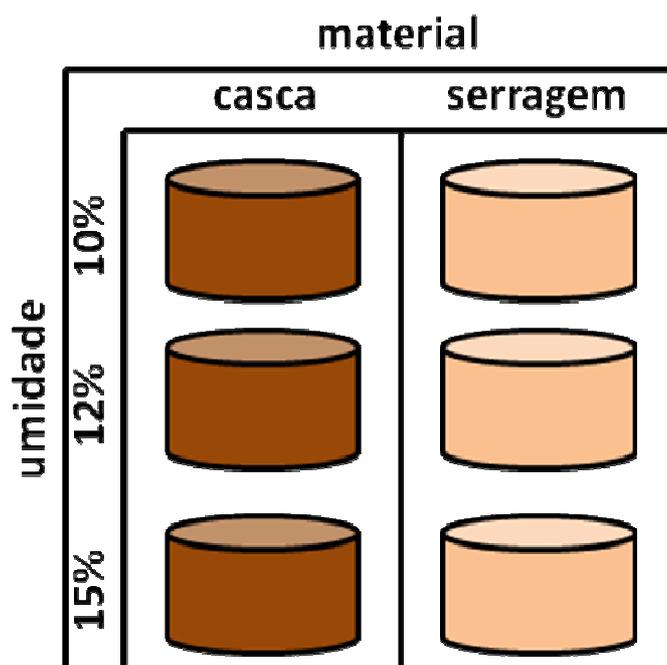


Figura 1. Esquema dos briquetes produzidos no estudo.

3.2 Classificação dos resíduos

Os resíduos de *Tectona grandis* L.f. foram classificados em dois grupos (Casca e Serragem) como ilustrado na Figura 2.



Figura 2. Resíduos da usinagem de *Tectona grandis* L.f.

Para facilitar a estocagem e transporte os materiais passaram por processo de pré-trituração em um moinho de martelo e assim foram embalados e transportados para os Laboratórios do Campus de Sorocaba, da UFSCar, onde, através de uma parceria estabelecida entre a UFRRJ e a UFSCar, foram realizadas as etapas de adequação do material, produção dos briquetes e análises físico-químicas.

3.3 Procedimentos de adequação do material para produção de briquetes

3.3.1 Moagem

O material foi moído novamente em moinho de facas tipo Willey (Figura 3) para que fosse obtida uma granulometria menor para o material, tanto proveniente da casca, como da serragem da madeira, para facilitar o processo de aglomeração das partículas durante o processo de briquetagem.



Figura 3: Moinho de facas tipo Willey.

3.3.2 Granulometria das partículas

Após a moagem os materiais foram separados granulometricamente através de um jogo de peneiras vibratórias de diferentes malhas (Figura 4). Foram separadas porções de partículas granulométricas de 40 mesh, 60 mesh, e 100 mesh.



Figura 4. Jogo de peneiras para classificação granulométrica.

3.3.3 Ajuste de umidade

Os resíduos de casca e serragem, já com a granulometria controlada, foram completamente secos em estufa convencional à $\pm 60^{\circ}\text{C}$ durante 4 dias. Após a secagem total, cada um dos materiais (casca e serragem) tiveram o percentual de umidade ajustado e esses foram divididos em três subgrupos cada, distinguidos pelo percentual de umidade de 10%, 12%, e 15%. Esse ajuste de umidade foi feito considerando que o material estava completamente seco, sendo borrifada a quantidade de água necessária para que o material obtivesse o teor de umidade desejado, em função do peso seca determinado.

Após a umidificação o material passou por um período de assemblagem em sacos plásticos vedados, por um período de 24hs para a homogeneização da umidade em todo o material. A leitura da umidade em todas as etapas foi realizada com o auxílio de balança dotada de dispositivo para determinação de umidade (Figura 5).



Figura 5. Balança para determinação de umidade.

3.4 Confeção dos briquetes

Os briquetes foram produzidos com o auxílio de uma prensa hidráulica (Figura 6) aplicando-se uma carga de 12 toneladas para a compactação das partículas. Utilizou-se 20 gramas de material para a confecção de cada briquete, sendo que as partículas foram inseridas em um molde de aço inoxidável que determinou a dimensão de cada briquete, produzido na forma de um pequeno cilindro. Depois de prontos, foram medidos o diâmetro e a altura de cada briquete (Figura 7) e estes foram acondicionados em papel alumínio e saco plástico vedado para conservar o teor de umidade até a etapa dos ensaios de resistência mecânica.



Figura 6. Prensa hidráulica utilizada na confecção dos briquetes.



Figuras 7. Detalhes dos briquetes produzidos.

3.5 Análises físico-químicas dos resíduos

3.5.1 Determinação do teor de extrativos solúveis em água

O teor de extrativos solúveis em água foi determinado pela norma TAPPI T212om-98. Em um béquer com 500ml de água destilada foi adicionada uma amostra de 3g do material, sendo o sistema submetido à agitação mecânica a $70\pm 5^{\circ}\text{C}$ por 1h (Figura 8).

Foram empregados no ensaio uma placa agitadora-aquecedora e barra magnética. Após este período de extração, as amostras foram filtradas em funil simples, com papel de filtro e posteriormente levadas à estufa a $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ por um período de 4h. Seguiu-se o posterior resfriamento em dissecador com sílica gel e finalmente a amostra foi pesada em balança analítica. O teor de extrativos foi calculado pela diferença entre a massa da amostra inicial e a massa da amostra das fibras secas.



Figura 8. Sistema agitador-aquecedor para diluição de extrativos em água.

3.5.2 Determinação do teor de cinzas

O teor de cinzas foi determinado pela norma TAPPI T211om-93. Foram adicionados 1g de amostra de cada um dos materiais em cadinhos previamente calcinados (com tara) a $600\pm 5^{\circ}\text{C}$ por 1h. As amostras foram previamente carbonizadas no cadinho com bico de Bunsen, até a ausência da chama (Figura 9). Os cadinhos com as amostras foram levados à mufla sob isoterma de $600\pm 5^{\circ}\text{C}$ por um período de 3h. Após resfriamento em dessecador com sílica gel, as amostras foram pesadas em uma balança analítica. O teor de cinzas foi determinado pela razão entre as massas final e inicial das amostras.



Figura 9. Carbonização para determinação do teor de cinzas.

3.5.3 Análise calorimétrica

Para a determinação do poder calorífico superior (PCS), amostras de aproximadamente 0,5g dos materiais foram pesadas em cadinho e colocadas no reator do calorímetro, ou bomba calorimétrica (Figura 10). O sistema é pressurizado a 30 bar com oxigênio.

As medições e cálculos do PCS foram padronizados com a norma DIN 51900, ISO 1928, ASTM D240, ASTM D1989, ASTM E711.



Figura 10. Bomba calorimétrica.

3.5.4 Ensaio de expansão volumétrica

Foram selecionados para este ensaio quinze briquetes de cada tratamento (casca e serragem) e realizou-se a medição do diâmetro e altura dos briquetes com paquímetro (Figura 11) para obter o volume do briquetes após a compactação.

Os briquetes permaneceram estocados durante 90 dias e o mesmo procedimento para aferição do volume foi realizado.

As condições de temperatura e umidade do ambiente em que os briquetes se encontravam, simulavam condições reais de estocagem comercial (23°C; 60% de umidade relativa).



Figura 11. Medição do briquete com paquímetro digital.

A expansão volumétrica foi obtida a partir da seguinte Equação 01.

$$\text{Exp} = (\text{Vol}_2 - \text{Vol}_1) / \text{Vol}_1 \times 100 \quad (01)$$

Onde:

Exp: expansão volumétrica dos briquetes;

Vol₁: volume do briquete imediatamente após a compactação (cm³);

Vol₂: volume do briquete após 90 dias (cm³);

3.5.5 Densidade

A determinação da densidade aparente dos briquetes de cada um dos 6 tratamentos foi feita por método estereométrico, através da razão dos valores de massa e volume dos briquetes. A determinação do volume foi feita através da medição das dimensões das amostras de briquetes com massa conhecida (20 gramas).

Para se ter um parâmetro de comparação da densificação do material através da briquetagem, foram realizados ensaios de determinação de densidade da madeira da teca. Para a determinação da densidade aparente da madeira de teca foram confeccionados 20 corpos-de-prova com dimensões de 2cmx3cmx5cm segundo parâmetros e padrões da norma ABNT NBR

7190:1997 (ABNT, 1997). Foi feita a medição e a pesagem dos corpos-de-prova. Obteu-se a densidade aparente através da razão entre o peso da massa úmida e o volume úmido à 12% de umidade da madeira.

3.6 Ensaio de resistência mecânica: resistência à tração por compressão diametral

No teste de aplicação de carga foi utilizada a máquina universal de ensaios, marca Contenco, modelo UMC- 300, com capacidade de 30 toneladas, que utiliza o software Pavitest para ensaios em amostras de madeira e materiais derivados.

A célula de carga utilizada foi de 500 quilogramas, sendo avaliados quinze briquetes como repetições de cada tratamento. A carga foi aplicada no sentido diametral dos briquetes. Para cada corpo-de-prova foram aferidos o diâmetro e a altura com paquímetro digital. A Figura 12 ilustra o ensaio de compressão diametral e o sentido da aplicação da carga no briquete.



Figura 12. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

3.7 Análise estatística

Para a análise estatística foi utilizado o software livre ASSISTAT, software de uso livre, disponível em <http://www.assistat.com>.

O experimento foi analisado estatisticamente seguindo um delineamento inteiramente casualizado, com composição fatorial para as variáveis densidade, compressão diametral e expansão volumétrica.

No delineamento fatorial foram considerados dois fatores de avaliação, sendo o primeiro “tipo de resíduo” presente na composição dos briquetes, com dois níveis: casca e serragem; e, o segundo fator o “teor de umidade” dos briquetes com três níveis: 10%, 12% e 15%. Sendo assim, caracterizou-se uma avaliação do tipo 2x3, totalizando 6 tratamentos descritos a seguir:

- T1: briquete de **casca** com **10%** de umidade;
- T2: briquete de **casca** com **12%** de umidade;
- T3: briquete de **casca** com **15%** de umidade;
- T4: briquete de **serragem** com **10%** de umidade;
- T5: briquete de **serragem** com **12%** de umidade;
- T6: briquete de **serragem** com **15%** de umidade.

Os resultados obtidos para cada tratamento foram avaliados e discutidos a partir da observação da média, coeficientes de variação e análises de variância, que considerou os níveis dos fatores de variação entre os tratamentos e suas interações.

Para as médias obtidas nos ensaios em que a análise de variância apresentou valor de F significativo, foram realizados os testes de comparação de média de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados obtidos para cada ensaio realizado nos briquetes. No Anexo 1 encontram-se as análises de variância que precederam à comparação das médias determinadas para cada ensaio ou variável.

4.1 Granulometria

A padronização granulométrica é importante para a melhor acomodação das partículas quando submetidas à pressão, contribuindo com a eficácia do processo de briquetagem.

Neste estudo, optou-se em primeiro momento por se utilizar as partículas de granulometria na faixa entre 40 mesh e 60 mesh para a confecção dos briquetes, pois foi a classe granulométrica com maior quantidade de partículas retidas durante o peneiramento, cumprindo assim a exigência da uniformidade granulométrica para a confecção dos briquetes.

Porém os briquetes produzidos com as partículas classe da granulométrica entre 40 mesh e 60 mesh não tiveram boa aglutinação durante a compactação no processo de briquetagem e esfarelaram logo após a briquetagem.

A partir deste evento, se levantou as hipóteses de que partículas de tamanho menor do mesmo material utilizado anteriormente poderiam ter uma melhor aglutinação para a fabricação dos briquetes, ou caso contrário, de que seria necessária a adição de algum tipo de liga aglutinante ao material para dar estabilidade aos briquetes.

Barbosa (2009) observou que a homogeneidade do formato e a granulometria dos briquetes são características importantes para regular e melhorar a eficiência da queima. E que também facilitam as operações de manuseio, transporte e alimentação de caldeiras.

Para dar continuidade ao experimento optou-se pela utilização das partículas retidas na peneira de 100 mesh, que continha partículas mais finas com aspecto de pó, que resultaram em briquetes muito estáveis com melhor aglutinação que os fabricados anteriormente. Estes foram os briquetes utilizados para os demais ensaios deste estudo.

Observou-se neste estudo, que além da uniformidade granulométrica é necessário que o tamanho das partículas sejam menores para a formação de briquetes de maior qualidade quando utilizado cascas e serragem da teca jovem.

Esta constatação diferiu de trabalhos anteriores, com outros materiais, que relacionaram a granulometria das partículas com a formação de briquetes, já que outros autores apontam briquetes de melhor qualidade com a granulometria maior das partículas em outros materiais, principalmente o carvão.

Pereira et al. (2008), analisaram briquetes produzidos a partir de finos de carvão vegetal de *Eucalyptus* sp aglutinados com adesivo de silicato de sódio, e concluíram que a granulometria pode influenciar no poder calorífico e percentual de carbono fixo dos briquetes. Neste estudo a granulometria de 20 mesh e 15% de adesivo apresentaram os maiores valores de poder calorífico, e aqueles com granulometria de 60 mesh e 15% de adesivo, apresentaram os maiores percentuais de carbono fixo.

Morais (2007) afirma que diferentes granulométricas de resíduos ligno-celulósicos facilitam o adensamento assim como partículas de 6 mm à 8 mm ou maiores proporcionam bons resultados.

Sampaio et al. (2007) afirmam que quando os briquetes são feitos sem aglomerantes, o sucesso do processo da briquetagem dependerá da moagem ou deformação plástica das partículas para aproximá-las o máximo possível, portanto a acomodação de partículas menores quando submetidas a pressão estará mais propensa a essa aproximação.

4.2 Poder calorífico

Os resultados médios das repetições para a determinação do poder calorífico superior (PCS), dos materiais constituintes dos briquetes são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Poder calorífico médio dos briquetes:

Material	kcal/kg
Casca	3559,14 b
Serragem	3813,90 a

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, segundo o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Os valores encontrados se mostraram similares aos de outros materiais utilizados na produção de briquetes.

Vários autores apontam valores próximos ao verificados neste trabalho em outros materiais de grande potencial energético (Tabela 4). Porém estes valores estão abaixo dos desejáveis para uso siderúrgico, em torno de 4300 kcal/kg a 5000 kcal/kg (SILVEIRA, 2008).

4.3 Densidade

A madeira de teca de 11 anos de idade avaliada neste trabalho apresentou densidade aparente média de 0,697g/cm³, similar à madeira com maior idade comumente comercializada geralmente em torno de 0,650 g/cm³ (IPEF, 2003).

A Figura 13 apresenta os valores de densidade aparente encontrados para cada material estudado considerando o valor de umidade de 12%.

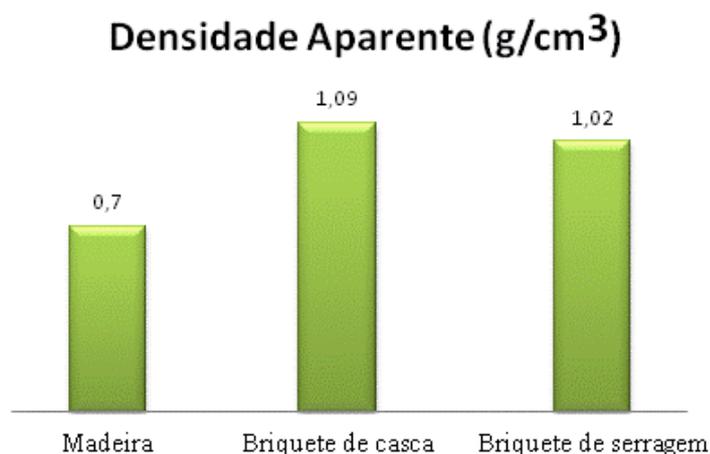


Figura 13. Densidade aparente da madeira e briquetes de *Tectona grandis* L.f. (U=12%).

A Figura 13 ilustra que a compactação da casca e serragem através da briquetagem gerou briquetes com densidade maior do que a madeira. Isso permite afirmar que se tem mais energia em 1m³ de briquetes do que em 1m³ de resíduos. Brito (1991) afirma que o fator densidade é a característica que apresenta maior correlação com a capacidade de combustão de um material.

A Tabela 8 apresenta os valores de densidade aparente entre os seis tipos de briquetes confeccionados nesta pesquisa. Os briquetes de casca apresentaram densidade aparente média maior que os de serragem, correspondendo a 1,077 g/cm³ e 1,009 g/cm³ respectivamente (médias entre os três teores de umidade).

Tabela 8. Resultados médios de densidade aparente (g/cm³) dos briquetes considerando a interação entre os fatores umidade e material:

Material	Umidade		
	10%	12%	15%
Casca	1,1219 aA (3,51)	1,0927 aB (3,51)	1,0171 aC (5,70)
Serragem	1,0402 bA (5,26)	1,0169 bB (5,26)	0,9721 bC (0,07)

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, segundo o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Letras minúsculas avaliam as médias da mesma coluna, letras maiúsculas as médias da mesma linha. Os valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação.

Os valores médios de densidade aparente exibidos na Tabela 8 apontam que os briquetes de casca apresentaram maior densidade que os de serragem e conseqüentemente melhor compactação durante a briquetagem.

A densidade dos briquetes deste estudo está dentro dos padrões dos briquetes comercializados e empregados na indústria. Silveira (2008), afirma que a densidade que um briquete de uso siderúrgico deve apresentar fica entre 1 g/cm³ e 1,3 g/cm³.

Quirino (2002) aponta valores de densidade para briquetes feitos de outros materiais que são comumente comercializados: serragem 1,22 g/cm³; casca de arroz 1,28 g/cm³; bagaço de cana 1,10 g/cm³.

4.4 Umidade

O teor de umidade convencionalmente utilizado em briquetes disponíveis no mercado geralmente é de 10% sendo que, a qualidade dos briquetes é afetada quando o teor de umidade varia mesmo em faixas pequenas (entre 2% a 5% do ideal) (Quirino 2002).

Como não há registros da utilização de resíduos de usinagem de teca jovem para produção de briquetes, foi realizada a divisão do material em faixas de umidade para descobrir qual a melhor para a briquetagem desta espécie, como foi comentado na metodologia do trabalho.

Neste estudo o fator umidade teve forte correlação com a densidade aparente, afetando a qualidade da compactação dos briquetes (Figura 14).

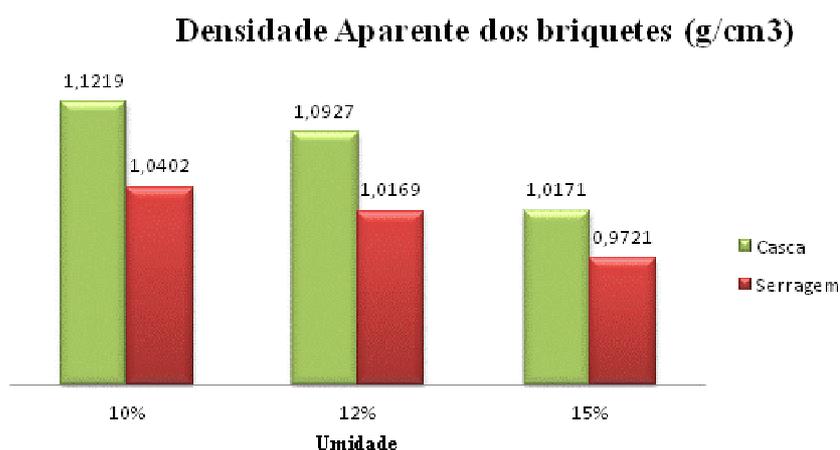


Figura 14. Densidade aparente dos briquetes (g/cm³) fabricados com teores de umidade das partículas estabelecidos em 10%, 12% e 15%.

Como pode ser observado na Figura 14, o teor de umidade das partículas de 10% é o mais adequado para a fabricação de briquetes de cascas ou serragem de *Tectona grandis* L.f. A melhor compactação dos briquetes em menores teores de umidade é um resultado muito positivo já que a umidade prejudica o aproveitamento energético dos resíduos de madeira.

Quirino (2002), afirma que a umidade reduz a quantidade de energia global produzida durante a combustão, ou seja, uma parte da energia contida nos resíduos é utilizada para aquecer e vaporizar a umidade. São necessárias 580 calorias para evaporar 1 grama de água. Na prática o material seco oferece combustão mais rápida e melhor rendimento na carbonização.

Barbosa (2009) obteve resultados excelentes na fabricação de briquetes com serragem de eucalipto, cujo teor médio umidade era de 10,7 %.

Gomes & Pimenta (2010), apontam também a relação entre umidade e poder calorífico. Em um estudo que analisou a lenha e o briquete de serragem de *Hymenaea courbaril* e *Mimosa hostilis* Benth, concluíram que o valor de umidade das partículas dentro dos limites ótimos para a briquetagem foi abaixo de 15%, sendo que o poder calorífico é menor quando teor de umidade contida no material é maior, o que deixou a lenha em desvantagem em relação ao briquete.

4.5 Cinzas

As cinzas agregam todos os elementos que não são relevantes na reação de combustão como o potássio, o fósforo e o cálcio. Além disso, se tornam material residual que após a queima se acumulam, o que é indesejado, por exemplo, em caldeiras e alto-fornos industriais. Portanto é desejada a menor concentração possível desse elemento em materiais utilizados para produção de briquetes.

Os resultados da análise do teor de cinzas apontaram que a serragem apresentou o teor médio de 14,80% e a casca de 17,88% (Tabela 9).

Tabela 9. Teor de cinzas médio dos briquetes:

Material	kcal/kg
Casca	17,88 a
Serragem	14,80 b

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, segundo o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A quantidade de cinzas encontradas nos materiais estudados foi alta, considerando os padrões de uso industrial abaixo de 2% (SILVEIRA, 2008). Porém o mesmo autor ressalta que o elevado teor de cinzas não se constituiu necessariamente em fator limitante para o desempenho de um briquete na combustão.

Brito (1991), analisou algumas marcas de briquetes de uso doméstico vendidos a varejo em supermercados, e encontrou o teor de cinzas médio de 21,28%.

Considerando estas informações, é indicada a utilização comercial em padarias, pizzarias, churrasarias e mesmo doméstica, para os briquetes avaliados neste estudo.

4.6 Extrativos

Entre os extrativos, estão os elementos presentes na madeira como os terpenos, as resinas, os óleos voláteis, as graxas, as ceras e os taninos. Para a produção de energia, alguns tipos de extrativos podem contribuir para aumentar o poder calorífico da madeira (PEREIRA et al., 2000).

O teor médio de extrativos encontrados na casca e serragem de *Tectona grandis* L.f. foi alto, com o valor de 7,85% e 1,58% respectivamente (Tabela 10).

Tabela 10. Teor de extrativos médio dos briquetes:

Material	kcal/kg
Casca	7,85 a
Serragem	1,58 b

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, segundo o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

4.7 Resistência mecânica

A fim de determinar o comportamento mecânico do briquete quando submetido à uma determinada carga ou esforço, foi realizado o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, expresso através da carga de ruptura, ou seja, os valores calculados foram da carga máxima suportada por cada briquete avaliado, até seu rompimento.

A resistência a tração média dos briquetes de casca foi de 89,70 kgf e os de serragem de 52,70 kgf com variação significativa entre as faixas de umidade, conforme ilustrado na Tabela 11 e Figura 15.

Tabela 11. Resultados médios das cargas máximas de ruptura (kgf) dos briquetes submetidos ao ensaio de tração considerando a interação entre os fatores umidade e material:

Material	Umidade		
	10%	12%	15%
Casca	108,11 (5,81) aA	96,40 (4,13) aB	64,60 (9,8) aC
Serragem	53,17 (12,19) bA	58,10 (8,17) bA	46,84 (7,06) bB

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, segundo o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Letras minúsculas avaliam as médias da mesma coluna, letras maiúsculas as médias da mesma linha. Os valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação.

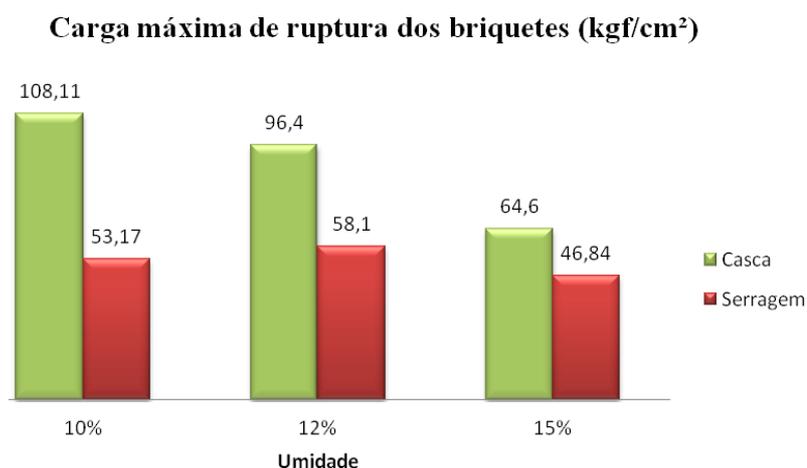


Figura 15. Carga máxima de ruptura (kgf) fabricados com teores de umidade de 10%, 12% e 15%.

Os valores médios de carga máxima de ruptura apresentados na Tabela 9 e ilustrados na Figura 15, apontam que os briquetes de casca apresentaram melhor resistência mecânica que os de serragem. Verificando o fator umidade constata-se que: os briquetes de casca tiveram melhor resistência com 10% de umidade; e, os briquetes de serragem tiveram melhor resistência com a umidade de 10% e 12%.

Motter et al., 1979 afirma que briquetes de boa qualidade devem ter resistência mecânica maior que 70kg/cm^2 para uso siderúrgico.

Brito (1991) encontrou o valor médio de resistência mecânica $31,71\text{ kg/cm}^2$ em briquetes de uso doméstico.

4.8 Expansão volumétrica

A variação dimensional entre os briquetes dos seis tratamentos foi perceptível conforme ilustrado na Figura 16. É importante ressaltar que todos possuíam o mesmo peso (20g) no momento da compactação/prensagem.

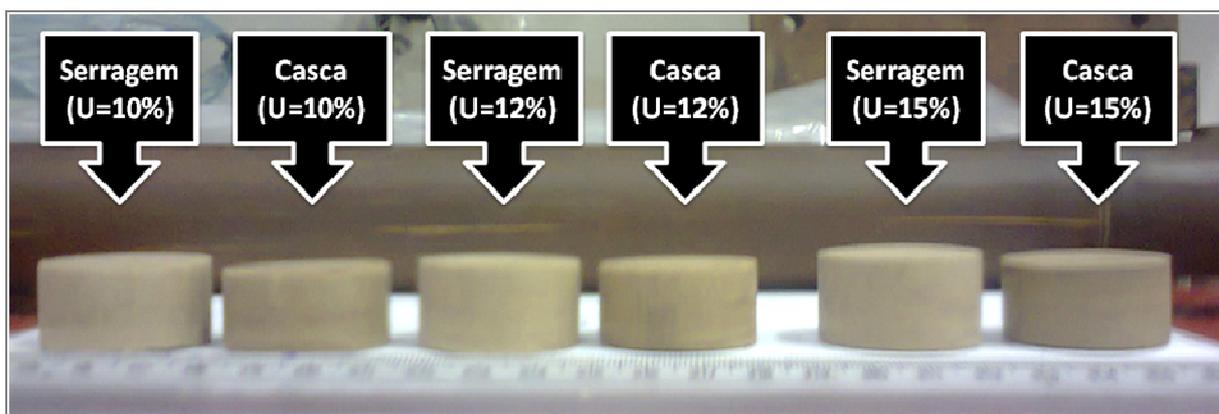


Figura 16. Variação dimensional dos briquetes.

A expansão média dos briquetes de casca foi de 6,3%, e dos de serragem de 8,4% com variação significativa entre as faixas de umidade das partículas conforme ilustrado na Tabela 12 e Figura 17.

Tabela 12. Resultados médios de expansão (%) dos briquetes considerando a interação entre os fatores umidade das partículas e material:

Material	Umidade		
	10%	12%	15%
Casca	0,6470 (18,79) bA	0,4650 (25,59) bB	0,7650 (23,28) aA
Serragem	0,9340 (14,36) aA	0,8600 (22,93) aAB	0,7160 (18,90) aB

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, segundo o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Letras minúsculas avaliam as médias da mesma coluna, letras maiúsculas as médias da mesma linha. Os valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação.

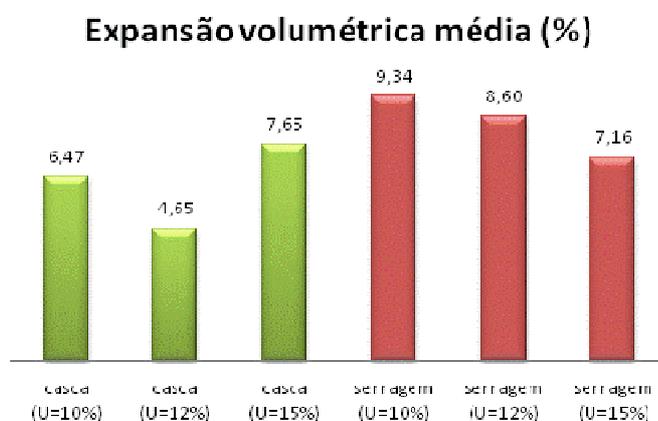


Figura 17. Expansão dos briquetes fabricados com teores de umidade de 10%, 12% e 15%.

Os valores médios de expansão apresentados na Tabela 12 e ilustrados na Figura 17, apontam que os briquetes de casca apresentaram menor expansão que os de serragem. Verificando o fator umidade, constata-se que a umidade não teve relação com a expansão dos briquetes.

Protásio et al. (2011), encontrou valores de expansão de 19% em briquetes de serragem de *Eucalyptus* sp., 35,3% em briquetes de resíduos de milho e 2,96% em briquetes de casca de café.

No geral os briquetes expandiram pouco no período de tempo verificado. Protásio et al. (2011) afirma que a maior variação na expansão ocorre nos primeiros dias após a fabricação, portanto pode-se considerar os valores de expansão verificados como totais, para os briquetes de casca e serragem da teca.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados encontrados neste trabalho podemos concluir que:

- A utilização da serragem gerada no processamento da madeira de *Tectona grandis* L.f. avaliada, assim como o uso da casca, se mostraram viáveis para compor a matéria-prima para a produção de briquetes;
- Dentro os teores de umidade avaliados na confecção dos briquetes, a melhor porcentagem foi a de 10% na grande maioria dos tratamentos. A variação dos resultados encontrados mostrou que o controle da umidade é bastante importante para a qualidade final dos briquetes dos resíduos de teca, portanto pode-se afirmar que a umidade afeta a qualidade dos briquetes.
- A granulometria que proporcionou melhor qualidade aos briquetes foi a de partículas mais finas (100 mesh), indicando que partículas mais finas tendem a se aproximar mais facilitando a compactação dos briquetes.
- Os briquetes demonstraram altíssima resistência nos ensaios mecânicos, sendo um fator muito positivo para garantir a integridade do produto nos processos de o transporte e estocagem.
- Os briquetes tiveram expansão volumétrica quase insignificante, o que garante a manutenção de padrões de densidade e umidade desejados, sendo uma característica muito positiva para a manutenção da qualidade deste produto até o consumidor final. Os briquetes podem assim ser classificados como de ótima estabilidade dimensional.
- O poder calorífico dos briquetes produzidos mostrou-se compatível para a utilização doméstica e comercial (padarias, pizzarias, churrasarias, entre outros);
- Devido a grande quantidade de cinzas encontrado nos resíduos, não se recomenda o uso siderúrgico dos briquetes;
- Os briquetes produzidos a partir dos resíduos da teca se mostraram resistentes e estáveis, portanto vale considerar o desenvolvimento de novas pesquisas para compensar o problema encontrado na quantificação das cinzas, para que seja possível utilizar estes resíduos em misturas de briquetes siderúrgicos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACIOLI, J. L. **Fontes de energia**. Editora UnB, Brasília. 138p. 1994.

ANTUNES, R.C. **Briquetagem de Carvão Vegetal: Produção e Utilização de Carvão Vegetal**. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC. Série de Publicações Técnicas n.8, p: 197 -206. Belo Horizonte – MG. 1982.

ARRUDA, T.P.M. de; SOUSA, A.P.M.; CARLESSO, J. Avaliação das propriedades energéticas do carvão vegetal de resíduos da espécie de teca (*Tectona grandis* L.). In: 5 Congresso Internacional de Bioenergia. **Anais**. Curitiba-PR. 2010.

ASSI, A.; LEAI, F. L.; ULHOA, M. B.; BORBA, P. E.; MASCARENHAS e SILVA, Y.I.A. Perspectiva do carvão Babaçu como Alternativa Energética na Siderurgia Brasileira. Centro de Pesquisas da Usiminas. Contribuição Técnica n 1.654. XXXVI Congresso Anual da ABM. **Anais**. Recife-PE, 1981.

ASTM. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of soil – Designations D422-63. American Society for Testing and Materials. Philadelphia – USA. 1990.

BEHAGHEL, I. Etat des plantations de teck (*Tectona grandis* L.f.) dans le monde. **BFT**. v262 n4. p 6-18. France. 1999.

BEN - BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL: BRASIL MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional 2011**: Ano base 2010.

BEZZON, G. **Tecnologias de Conversão Energética de biomassa**. EDUA/EIFEI. Manaus-AM, p39-57, 1997.

BIOMACHINE. Briquetes. In: <<http://www.biomachine.com.br/biomachine.asp>>. Acesso em: 01/07/2010.

BIOMAX. Briquetes. In: <<http://www.biomaxind.com.br/site.html>>. Acesso em: 01/07/2012.

BRAND, M.A.; MUÑIZ, G.I.B.; SILVA, D.A.; KLOCK, U. Caracterização do rendimento e quantificação dos resíduos gerados em serraria através do balanço de materiais. **Revista Floresta**. n32.p247-259. 2002.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Matriz Energética Nacional 2030**. Ministério de Minas Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. 254p. Brasília : MME : EPE, 2007.

BRITO, J. O. **O uso energético da madeira**. Estudos Avançados, v. 21, n. 59, p. 1-9, 2007. Disponível em: <http://www.sbs.org.br/destaques_ousoenergeticodamadeira.pdf?PHPSESSID=0011f88a4f173d6c3bfcde8200fa5f66>. Acesso em: 04/05/2011

BRITO, J.O. **Princípios de Produção e utilização do carvão vegetal de madeira**. Piracicaba: ESALQ. 19p. 1990.

BRITO, J.O. Reflexões sobre a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico. **Circular Técnica IPEF** n. 181. 6p.1993.

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

BRITO, J.O., BARRICHELO,L.E.G. USOS DIRETOS E PROPRIEDADES DA MADEIRA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA. **Circular Técnica IPEF** – Filosofia de trabalho de uma elite de empresas florestais brasileiras n 52. 1979.

BARBOSA, J.C. de M. **Utilização de tanino e derivados ligno-celulósicos na preparação de areias de fundição e de briquetes de resíduos vegetais**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica- RJ. 2009.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal. **Circular Técnica IPEF** n 14. p.9-20. 1977.

BROSCH, C. D.; FURUNO, J. K. Aproveitamento dos Finos de Carvão Vegetal. Divisão de Metalurgia do IPT. Contribuição Técnica número - 748. **Anais**. XXII Congresso Anual da ABM. Vitória-ES.1968.

CARVALHO, E.A.; BRINCK, V. **Briquetagem**. Ministério da Ciência e Tecnologia/Centro de Tecnologia Mineral. Rio de Janeiro. 2004.

CHIRISOSTOMO,W., YAMAJI, F.M., COSTA, D.R. A influência do teor de umidade no processo de formação de briquetes de serragem. **Revista da Madeira**. n 120. 2009.

COSTA, D.R., YAMAJI, F.M., VENDRASCO,L., FLORES, W.DE.P., CHIRISOSTOMO,W. Efeito da granulometria nas propriedades físico-mecânico de briquetes de Pinus sp. Artigo Técnico. **Revista da Madeira**. Agosto. 2010. In: <http://www.remade.com.br/br/artigos_tecnicos.php?sub=232&categoria=&subcategoria=Briquetes>. Acesso em: 19/01/2012.

COTTA, A.M.G. **Qualidade do Carvão Vegetal para Siderurgia**. Monografia.Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG. 1996.

CUNHA, M. P. S. C. Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras. In: Encontro brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira v.2, p. 93-121. São Carlos. **Anais**. São Carlos-SP: 1989.

DOAT, J. Le pouvoir calorifique des bois tropicaux. **Revue Bois et Forêts Tropicaux**. France, n. 172, p.33-48. 1977.

DRESCHER, R. **Crescimento e produção de *Tectona grandis* Linn f., em povoamentos jovens de duas regiões do Estado de Mato Grosso- Brasil**. 109p. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal). Universidade Federal de Santa Maria. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS. 2004.

DRESCHER, R.; PELISSARI, R.A.; FERNANDO GAVA, F.H. Fator de forma artificial para povoamentos jovens de *Tectona grandis* Linn F. em Mato Grosso. **Pesquisa Florestal Brasileira Brazilian Journal of Forestry Research**. v.30, n 63. 2010.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Anuário estatístico 2004**. Disponível em: <<http://www.fao.org/>>. Acesso em 24/05/2012.

FAO - Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. **Situación de los bosques del mundo**. Roma-Itália. 2003. In: <<http://www.fao.org/DOCREP/005/Y7581S/Y7581S00.HTM>>. Acesso em: 21/04/2011.

FIEC - FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO CEARÁ. Briquete: Alternativa rentável e ecológica. 2003. Disponível em: <<http://www.fiec.org.br/publicacoes/jornalfiec/edicoes/0603>>. Acesso em: 19/01/2012.

FERRI, M. G.; MENEZES, N. L. de; MONTEIRO, W. R. **Glossário ilustrado de botânica**. Departamento de Botânica da USP. São Paulo: Nobel. 1981.

FONTES, P. J. P.; QUIRINO, W. F.; OKINO, E. Y. A. **Aspectos técnicos da briquetagem do carvão vegetal no Brasil**. LPF/IBAMA, série técnica n.01, Brasília. 1989.

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

GAGLIARDI, A. **O que é desenvolvimento sustentável**. In:<<http://www.pirenopolis.com.br/ExibeNoticia.jsp?pkNoticia=257>>. Acesso em: 16/03/2012.

GOMES, K.M.F.; PIMENTA, H.C.D. potencialidade da reutilização dos resíduos de madeira para fins energéticos: Uma abordagem do ponto de vista da ecologia industrial no APL dos móveis da Grande Natal/RN. **Anais**. XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. São

Carlos- SP. 2010. In: <<http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2010.TN.STP.121.788.17405.pdf>>. Acesso em: 25/05/2012

GONÇALVES, J.E. **Caracterização química e energética de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *eucalyptus grandis***. Dissertação (Mestrado em Agronomia e Energia na Agricultura). Universidade Estadual Paulista “Júlio De Mesquita Filho”- Unesp. Botucatu-SP. 2006.

INGHAM, J. M. **Biomassa no mundo e no Brasil**. In: Fontes não convencionais de energia: as tecnologias solar, eólica e de biomassa 2.ed. 160 p. Editora da UFSC, Florianópolis – SC. 1999.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTUDOS FLORESTAIS - IPEF. *Tectona grandis*. 2003. In: <<http://www.ipef.br/identificacao/tectona.grandis.asp>> Acesso em: 28/05/2011.

KLOCK, H., MUNIZ, G.I.B. **Química da Madeira**. Série Didática da FUPEF/PR, segunda edição. Curitiba- PR, 1998.

LAMPRECHT, H. **Silvicultura nos trópicos: ecossistemas florestais e respectivas espécies arbóreas, Possibilidade e métodos de aproveitamento sustentado**. Eschborn: Dt Ges. Für Techn. Zusammenarbeit (GTZ). GmbH. 343p. 1990.

LEÃO, R. M. **A floresta e o homem**. São Paulo: Edusp. 448 p.2000.

LORENZI, H., SOUZA, H.M., TORRES, M.A.V.; BACHER, L.B. **Árvores exóticas no Brasil: madeireiras, ornamentais e aromáticas**. Plantarum, Nova Odessa. 2003.

MACEDO, R.L.G; GOMES, J.E.; VENTURINI, N.; SALGADO B.G. Desenvolvimento inicial de *Tectona grandis* L.f. (Teça) em diferentes espaçamentos no município de Paracatu, MG. **Revista Cerne** v 11 n 1. Universidade Federal de Lavras. Lavras-MG. p 61-69. 2005.

MANNINEN, A.M.; PASANEN, P.; HOLOPAINEN, J. K. Comparing the VOC emission between air-dried and heat-treated Scots pine wood. **Atmospheric Environment**. n36. p 1763-1768. 2002.

MORAIS, D. M. **Briquetes de Resíduos Ligno-Celulósico como Potencial Energético para a queima de blocos cerâmicos: Aplicação em uma indústria de cerâmica vermelha que abastece o Distrito Federal**. 230f. Tese (Doutorado) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília. Brasília. 2007.

MOTTER, C.; ARFELD, DIEGO, E.; RODRIGUEZ, E.; CABALEIRO, M.A.C. Aproveitamento dos Finos de Carvão Vegetal para Produção de Briquetes de Uso Siderúrgico. Mannesmann S.A. **Anais**. XXXIV Congresso Anual da ABM. Porto Alegre – RS. 1979.

OLIVEIRA, L. de; GARCIA, R. V.; COLLET, F. S. Aglomeração dos Finos de Carvão Vegetal. Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira. Contribuição Técnica número - 341. **Anais**. XIV Congresso Anual da ABM. Belo Horizonte-MG. 1959.

OOCITIES ORGANIZATION. Teca (*Tectona grandis*). In: <www.oocities.org/vgs_reflorestal/Teca.html>. Acesso em: 15 de maio de 2012.

PALERMO, G. P. M. **Propriedades e comportamento tecnológico da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill Ex- maiden visando a sua utilização em produtos de maior valor agregado.** Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ., 237p. 2010

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

PEREIRA, F.A.; CARNEIRO, A.C.O, VITAL, B.R., LÚCIA, R.M.D., PATRÍCIO JÚNIOR, W., BIANCHE, J.J. Propriedades físico-químicas de briquetes aglutinados com adesivo de silicato de sódio. **Revista Floresta e Ambiente.** v 16 n 1. p 23-29. 2008.

PEREIRA JÚNIOR, V. B. Alternativas para a co-geração de energia de uma indústria de chapas de fibra de madeira. **Energia na Agricultura** v.17 n.1. p.34-37. 2001.

PÉREZ, D.; KANNINEN, M. Effect of thinning on stem form and wood characteristics of teak (*Tectona grandis*) in a humid tropical site in Costa Rica. **Silva Fennica research articles** v39 n2. p217–225. Finland. 2005.

PROTÁSSIO, T. DE P.; ALVES, I.C.N., TRUGILHO; P.F.; SILVA, V.O.; BALIZA, A.E.R. Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. **Pesquisa Florestal Brasileira.** v.31.n 38. p.273-283. Colombo. 2011.

PUNTES, R.S.E.S. **Expansão das florestas plantadas com fins energéticos no Brasil e sua influência nas emissões dos gases de efeito estufa – gee: análise de dois cenários futuros.** Dissertação (mestrado) UFRJ/COPPE/ Programa de Planejamento Energético. Rio de Janeiro-RJ. 2010.

REIS, C.A.F. Estado da arte de plantios com espécies florestais de interesse para o Mato Grosso. Documentos: Embrapa Florestas. 1ª Ed. Colombo-PR. 2011.

QUIRINO,W.F. **Briquetagem de resíduos Ligno-Celulósticos.** IBAMA/LPF.Brasília.p 100-106. 2005a.

QUIRINO, W.F. Poder Calorífico da Madeira e de Materiais lignocelulósicos. **REMADE-Revista da Madeira** n 89. 2005b.

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 Renabio: Biomassa & Energia**, v. 1, n. 2, p. 173-182, 2004.

QUIRINO, W.F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. MMA/LPF. Brasília. 2002.

QUIRINO, W.F.; BRITO, J.O. **Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal**. IBAMA/LPF. Brasília. 1991.

QUIRINO, W.F.; FONTES, P.J.P.; OKINO, E.Y.A. **Aspectos técnicos da briquetagem de carvão no Brasil**. IBAMA/LPF série técnica nº1. Brasília 1989.

ROMAN, T. D. Roll press agglomeration of industrial wastes for treatment and recycle. In: International Symposium On Extraction And Processing For The Treatment and Minimization Of Wastes. p. 14-18. **Anais**. Scottsdale. 1996.

RONDON NETO, R.M.; MACEDO, R.L.G.; TSUKAMOTO FILHO, A.A. **Formação de povoamentos florestais com *Tectona grandis* L.f. (Teca)**. Universidade Federal de Lavras. Boletim Técnico série extensão n 33. Lavras-MG. 1998

ROSSI, T.; MOURA, L.F.; TORQUATO, P.R., BRITO, J.O. Influência da Remoção dos Extrativos de Resíduos de Madeiras no Seu Poder Calorífico. 3rd International Workshop Advances in Cleaner Production. **Anais**. São Paulo-SP. 2011.

SAMPAIO, J.A., COSTA, L.S.N, ANDRADE, M.C. Ensaio contínuo de briquetagem em bancada piloto. **Comunicação Técnica**. CETEM/MCT. Rio de Janeiro. 2007. In: <<http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2007-072-00.pdf>>. Acesso em: 25/05/2012.

SANCHEZ, F.L.S.; REZENDE M.A. Estudo da viabilidade técnica e econômica para aproveitamento de cascas de eucalyptus gerados no processo de fabricação de painéis de madeira. **Revista Energia na Agricultura**, vol. 23, n 1, p.46-72. Botucatu-SP. 2008.

SARDINHA, R.M.A. **Lenha e carvão**: manual de apoio à extensão. IMVF – Instituto Marquês de Valle Flôr. Lisboa/Portugal. 2008.

SILVEIRA, M.S. **Aproveitamento das cascas de coco verde para produção de briquete em Salvador/BA**. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo). Universidade Federal da Bahia. Salvador-BA. 163p. 2008.

SILVEIRA, R. CAMPOS, C.; Falconi, V. Utilização de Finos de Carvão Vegetal - Acesita. **Anais**. Simpósio sobre Siderurgia Brasileira e matérias-primas. Salvador- BA. 1977.

SUÁREZ J. A.; BEATÓN P. A.; LUENGO C. A.; FELFLI F. F. Coffee Husk Briquettes: A new Renewable Energy Source. **Energy Sources** n 25.p 961-967. 2003.

TEIXEIRA,B.A.N; ZANIN,M. **Metodologias e técnicas de minimização, reciclagem e reutilização de resíduos sólidos urbanos**. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES. Rio de Janeiro,1999.p25-27.

TEWARI, D.N. **A monograph on teak** (*Tectona grandis* Linn. f.). International Book Distributors. Dehra Dun-India. 1992.

ULHOA, M. BOTELHO; BORBA, P. E. MASCARENHAS E SILVA, Y. I. ALVES. Emprego de Carvão Vegetal em Coquearias através do Processo de Coqueificação em mistura de briquete. Centro de Pesquisas da Usiminas. **Revista Metalurgia-ABM** v41 n329. Sao Paulo-SP.1985.

VALLE, C.E. **Qualidade Ambiental: o desafio de ser competitivo protegendo o meio ambiente**.São Paulo.Pioneira.1995.

VITAL, B. R. Métodos de determinação de densidade da madeira. Boletim técnico SIF. 21p.Viçosa-MG. 1984.

VITAL, B.R.; OLIVEIRA,A.C.; CARNEIRO, A.C.O.; PACHECO, R.M.; GORGENS, E.B.; PEREIRA, B.L.C.; SANTOS, R.C. poder calorífico superior da madeira de *Tectona grandis* em função da idade e das condições edáficas. XII Encontro brasileiro em madeiras e estruturas de madeiram (EBRAMEM). **Anais**. Lavras-MG. 2010.

WWF BRASIL. Questões ambientais do desenvolvimento sustentável. In: <http://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/questoes_ambientais/desenvolvimento_sustentavel>. Acesso em: 21/03/2012.

ANEXO

1) DENSIDADE APARENTE

EXPERIMENTO FATORIAL - QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F
Fator1(F1)	1	0,06834	0,06834	555,0302 **
Fator2(F2)	2	0,07858	0,03929	319,0722 **
Int, F1xF2	2	0,00388	0,00194	15,7709 **
Tratamentos	5	0,15081	0,03016	244,9433 **
Resíduo	54	0,00665	0,00012	
Total	59	0,15745		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$) . * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$) . ns não significativo ($p \geq .05$)

MÉDIAS E MEDIDAS

Médias do fator 1 (Material)

casca	1,07723 a
serragem	1,00973 b

Médias do fator 2 (Umidade)

10%	1,08105 a
12%	1,05480 b
15%	0,99460 c

MÉDIAS DE INTERAÇÃO

Fator 1 x Fator 2 (AxB)

Material	Umidade		
	10%	12%	15%
Casca	1,1219 aA	1,0927 aB	1,0171 aC
Serragem	1,0402 bA	1,0169 bB	0,9721 bC

Minúsculas: colunas, Maiúsculas: linhas

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

2) PODER CALORÍFICO

EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO - QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	1	194707,97280	194707,97280	3219,5046 **
Resíduo	10	604,77620	60,47762	
Total	11	195312,74900		

** ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$) . * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$) . ns não significativo ($p \geq .05$)

MÉDIAS DE TRATAMENTO

Casca	3559,14000	b
Serragem	3813,90000	a

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

3) RESISTÊNCIA MECANICA

EXPERIMENTO FATORIAL - QUADRO DE ANÁLISE

	FV	GL	SQ	QM	F
Fator1(F1)	1		20535,00000	20535,00000	975,7456 **
Fator2(F2)	2		7306,92933	3653,46467	173,5988 **
Int, F1xF2	2		3468,55600	1734,27800	82,4063 **
Tratamentos	5		31310,48533	6262,09707	297,5512 **
Resíduo		54	1136,45400	21,04544	
Total		59	32446,93933		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$) . * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$) . ns não significativo ($p \geq .05$)

MÉDIAS E MEDIDAS Médias do fator 1 (Material)

Casca	89,70333 a
Serragem	52,70333 b

Médias do fator 2 (Umidade)

10%	80,64000 a
12%	77,25000 a
15%	55,72000 b

MÉDIAS DE INTERAÇÃO Fator 1 x Fator 2 (AxB)

Material	Umidade		
	10%	12%	15%
Casca	108,1100 aA	96,4000 aB	64,6000 aC
Serragem	53,1700 bA	58,1000 bA	46,8400 bB

Minúsculas: colunas, Maiúsculas: linhas

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

4) CINZAS

EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	1	28,52083	28,52083	13,5373 **
Resíduo	10	21,06833	2,10683	
Total	11	49,58917		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$) . * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$) . ns não significativo ($p \geq .05$)

Médias de tratamento

Casca	17,88333 a
Serragem	14,80000 b

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

5) EXTRATIVOS

EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	1	117,93870	117,93870	2468,3696 **
Resíduo	10	0,47780	0,04778	
Total	11	118,41650		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$) . * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$) . ns não significativo ($p \geq .05$)

Médias de tratamento

Casca	7,85000 a
Serragem	1,58000 b

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

6) EXPANSÃO VOLUMÉTRICA

EXPERIMENTO FATORIAL QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F
Fator1(Material)	1	0,66782	0,66782	29,4002 **
Fator2(Umidade)	2	0,16645	0,08323	3,6640 *
Int, F1xF2	2	0,53616	0,26808	11,8021 **
Tratamentos	5	1,37043	0,27409	12,0665 **
Resíduo	54	1,22659	0,02271	
Total	59	2,59702		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$) . * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 = p < .05$) . ns não significativo ($p \geq .05$)

MÉDIAS E MEDIDAS Médias do fator 1 (material)

casca 0,62567 b
serragem 0,83667 a

Médias do fator 2 (umidade)

10% 0,79050 a
12 % 0,66250 b
15% 0,74050 ab

MÉDIAS DE INTERAÇÃO Fator 1 x Fator 2 (AxB)

Material	Umidade		
	10%	12%	15%
Casca	0,6470 bA	0,4650 bB	0,7650 aA
Serragem	0,9340 aA	0,8600 aAB	0,7160 aB

Minúsculas: colunas, Maiúsculas: linhas

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

* * *