

Densitometria de raios x na análise da  
qualidade de briquetes de resíduos de madeira

X Ray densitometry for waste wood briquetts analysis

Waldir Ferreira Quirino<sup>1</sup>, Isadora Valle de Oliveira Pinha<sup>2</sup>,  
Alessandro Cezar de Oliveira Moreira<sup>3</sup>, Frederico de Souza<sup>4</sup> e Mario Tomazello Filho<sup>5</sup>**Resumo**

Este trabalho avaliou se a análise de densitometria de raios X serve para avaliar a qualidade dos briquetes e ajudar a melhorar os processos de produção dos briquetes. Verificou-se pelos espectros densitométricos de raios X, que a densidade interna nos briquetes não se distribui de forma homogênea. Esse fato implica na produção de briquetes com reduzida resistência mecânica se baixa estabilidade dimensional. Foram fabricados briquetes em laboratório com resíduos de *Eucalyptus* sp., combinando-se diferentes pressões, temperaturas e tamanhos de partículas. Amostras desses briquetes com diferentes espessuras foram submetidas à técnica de densitometria de raios X. A resistência à compressão dos diferentes tratamentos foi avaliada, assim como suas características energéticas. Verificou-se que existe uma correlação alta e positiva da densidade aparente dos briquetes com sua resistência à compressão. Os perfis densitométricos de amostras de briquetes com 3 mm e 10 mm de espessura apresentaram diferenças significativa, mostrando que a espessura das amostras precisa ser melhor definida. A densidade média dos briquetes mensurada pelos ensaios de densitometria de raios X, foi significativamente diferente daquela obtida pelo método gravimétrico, confirmando a necessidade de ajustes do método de densitometria de raios X para que possa ser aplicado na caracterização dos briquetes. Com os resultados encontrados concluiu-se que a utilização da densitometria de raios X se mostra uma técnica promissora para a análise de qualidade de briquetes, necessitando contudo, definir a espessura ideal das amostras.

**Palavras-Chave:** densidade, densitometria de raios X, *Eucalyptus* sp., briquetes.

**Abstract**

This study evaluated if the X-ray densitometry of briquettes can help better understand the compactness of the biomass and also help improve the production process of briquettes. It has been observed and was confirmed through the X-ray densitometry that the internal density in the briquettes is not distributed homogeneously. The consequence of this is the production of fragile briquettes, which are also dimensionally unstable. Laboratory briquettes have been produced with residues of *Eucalyptus* sp. at different pressures, temperatures and particle size. Samples of these briquettes with different thicknesses underwent the technique of the X-ray densitometry. The compression strength of the briquettes was evaluated, as well as their energetic characteristics. It has been verified that there is a high and positive correlation of the density of the briquettes and their compression strength. The X-ray densitometry profiles of briquette samples measuring 3 mm and 10 mm thick offered a significant difference, which showed that the thickness of the samples needs to be better defined. The average density of the briquettes found through X-ray densitometry was quite different from the one obtained in the gravimetric method. This supported the need to adjust the method of X-ray densitometry of briquettes. It was concluded that the X-ray densitometry is pertinent for an analysis of the quality of the briquettes but it is still necessary to define the ideal thickness of the briquette samples to obtain better results.

**Keywords:** density, X-ray densitometry, *Eucalyptus* sp., briquettes.

<sup>1</sup>Analista Ambiental, Ph.D. Serviço Florestal Brasileiro - Setor de Energia da Biomassa do Laboratório de Produtos Florestais, 70919-970- Brasília/DF.

<sup>2</sup>Acadêmica em Engenharia Florestal. UNB - Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Florestal, Campus Universitário Darcy Ribeiro, 70919-970 - Brasília/DF. E-mail: [isadora.valle@hotmail.com](mailto:isadora.valle@hotmail.com)

<sup>3</sup>Analista Ambiental. Serviço Florestal Brasileiro - Setor de Energia da Biomassa do Laboratório de Produtos Florestais, 70919-970 - Brasília/DF e Mestrando em Ciências Florestais, Departamento de Engenharia Florestal. UNB - Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, 70919-970 - Brasília/DF. E-mail: [alechem@globocom](mailto:alechem@globocom)

<sup>4</sup>Professor, Ms., Instituto Federal de Brasília, Campus Samambaia, 72306-001 - Brasília/DF e Doutorando em Ciências Florestais, Departamento de Engenharia Florestal. UNB - Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, 70919-970 - Brasília/DF. E-mail: [frederico.souza@ifb.edu.br](mailto:frederico.souza@ifb.edu.br)

<sup>5</sup>Professor Doutor. ESALQ - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Quieroz" / USP - Universidade de São Paulo. Avenida Pádua Dias, Caixa Postal 09, CEP.13400-970, Piracicaba, SP. E-mail: [mtomazel@usp.br](mailto:mtomazel@usp.br)

## INTRODUÇÃO

A biomassa vegetal é uma alternativa excelente para complementar as necessidades atuais de energia a preços competitivos e com baixo impacto ambiental. Uma vantagem da biomassa vegetal é que, na maioria das vezes, ela é o resíduo gerado de atividades agroindustriais, diminuindo assim a pressão sobre os recursos naturais que são diretamente explorados como fonte de energia.

Todavia, para que esses resíduos se tornem combustíveis viáveis para a produção de energia, é necessário aplicar-se tratamento adequado ao mesmo. A compactação, ou o conhecido, processo de briquetagem, propicia a adequação necessária em termos de homogeneização e de densificação energética da biomassa. A briquetagem consiste no processo mecânico que converte um resíduo vegetal de baixa densidade em um combustível de mais elevada densidade energética, com baixa umidade, granulometria regular e uniforme, facilitando o transporte, armazenamento e processos de alimentação automática de caldeiras industriais.

A densitometria de raios X é uma técnica já utilizada na medicina (densitometria óssea) e já adaptada para a madeira. Ela possui sensibilidade e praticidade, além de permitir o detalhamento da estrutura interna de um corpo de prova da madeira. Segundo Belini *et al.* (2011), essa tecnologia tem sido utilizada para a caracterização de anéis de crescimento, na avaliação tecnológica de painéis de MDF e na caracterização anatômica de madeiras.

O Brasil é um país com uma base agrícola muito forte e estima-se que a cada ano cerca de 330 milhões de toneladas de resíduos de biomassa são gerados (FELFLI *et al.*, 2011). Na maioria das vezes tais resíduos não são usados como fonte de energia, por não possuírem boas características energéticas, como uma satisfatória densidade energética e um baixo teor de umidade. Uma solução para corrigir essas deficiências é utilizar a densificação da biomassa, produzindo briquetes, que apresentam maior quantidade de energia por unidade de volume. Ao mesmo tempo se elimina o excesso de umidade e se regulariza a granulometria, facilitando a logística, por otimizar o volume transportado e armazenamento.

Os principais resíduos briquetados no Brasil são: resíduos de madeira (destopos, refiles, serragem, aparas e sobras), casca de arroz e casca de

café, de soja, bagaço de cana, resíduos de milho e vários outros resíduos agroindustriais. O principal mercado é o da substituição da lenha na indústria (cerâmica, olaria, indústria alimentícia e outras que necessitam de vapor de processo), em restaurantes, pizzarias, padarias e hotelaria.

Pode-se considerar a logística como sendo a principal preocupação da atividade de briquetagem, tanto para a coleta da matéria-prima do processo (os resíduos), assim como, na distribuição do produto. A expansão do setor depende basicamente de três fatores: disponibilidade de resíduos, tanto em quantidade como em concentração; usinas bem organizadas e dispostas de processos de qualidade; e o mercado consumidor dos briquetes (FELFLI *et al.*, 2011). O Brasil possui abundância de resíduos vegetais, mas estes, nem sempre estão concentrados junto a grandes centros consumidores e nem sempre existe uma boa estrutura viária para efetuar-se a coleta dos resíduos. Quanto à tecnologia de briquetagem, continua a mesma nos últimos 60 – 80 anos. Como as usinas de briquetagem devem estar mais próximas dos resíduos, muitas vezes tais usinas ficam distantes dos centros consumidores, encarecendo o transporte do produto.

A técnica da briquetagem surgiu nos Estados Unidos em 1848, por meio de uma patente concedida a William Easby para um método de conversão de carvão miúdo em torrões sólidos. A tecnologia foi disseminada por toda a Europa, sendo a utilizada no Brasil proveniente da Alemanha (SILVEIRA, 2008). Outros autores ainda afirmam que a técnica de aglomeração de finos de combustíveis surgiu com os homens das cavernas que aglomeravam resíduos das fogueiras com sangue animal para requeimar posteriormente.

A briquetagem consiste em um processo de compactação de resíduos, podendo ter origem vegetal, mineral, resto de metais e produtos químicos variados. Esses resíduos geralmente possuem baixa densidade, o que dificulta e encarece o transporte. Para melhorar o transporte e o armazenamento desses resíduos é necessário densificá-los por meio da briquetagem, promovendo a valoração dos mesmos e a homogeneização em termos de umidade, granulometria e densidade (QUIRINO; BRITO, 1991).

A compactação dos resíduos vegetais (galhos, casca de arroz e café, bagaço, serragem, entre outros) tem como principal objetivo torná-los mais eficientes para sua utilização como combustíveis sólidos, por meio da combustão direta. Segundo Quirino e Brito (1991), a briquetagem

gem é muito eficiente em concentrar a energia disponível na biomassa. Levando em consideração a densidade a granel e o poder calorífico do material, 1,0 m<sup>3</sup> de briquetes contém de 2 a 5 vezes mais energia que 1,0 m<sup>3</sup> de resíduos.

Os briquetes são formados por meio de um processo que consiste na aplicação de pressão em uma massa de partículas dispersas com o objetivo de gerar um sólido geométrico compacto de alta densidade. Nos briquetes de origem vegetal, a lignina, polímero estrutural da madeira e dos resíduos ligno-celulósicos, atua como ligante das partículas, já que através de elevadas pressões e temperaturas (100 °C a lignina amolece e age como um adesivo de partículas). Também, o uso de temperaturas elevadas reduz a umidade da biomassa, influenciando positivamente no poder calorífico útil do briquete (FILIPPETTO, 2008; SILVEIRA, 2008).

Vários são os fatores que afetam diretamente na qualidade do briquete. Dentre os principais citam-se: teor de umidade do resíduo vegetal, tamanho das partículas do resíduo, pressão e temperatura utilizada na compactação. No processo de compactação os resíduos devem estar devidamente secos e moídos.

Existe uma faixa de teor de umidade onde o material pode ser compactado adequadamente, variando em função do tipo de matéria-prima e do processo de compactação. A justificativa técnica desse comportamento se encontra na transição viscoelástica da lignina que é dependente dos teores de umidade da mesma.

Também, o teor de umidade elevado pode provocar explosões devido à formação de vapor de água no interior da biomassa e que produz briquetes instáveis dimensionalmente. Partículas muito secas dificultam a ligação entre as mesmas. Estudos com biomassa de *Eucalyptus* sp. recomendam um valor de 8 a 12% para o teor de umidade da matéria-prima (GONÇALVES, 2010).

Uma mistura de partículas de vários tamanhos resulta na matéria-prima ideal, sendo que uma granulometria entre 5 a 10 mm é aceitável. Segundo Eriksson *et al.* (1990), a densidade final do briquete é influenciada pelo tamanho inicial das partículas, sendo que uma matéria-prima com granulometria muito baixa resulta em briquetes mais densos, contudo necessita de altas pressões e temperaturas para que as partículas se consolidem.

Segundo Filippetto (2008), a pressão aplicada durante a compactação influencia na densidade do briquete. Reed, Trezek e Diaz (1980),

citados por Filippetto (2008), afirmam que há uma relação linear entre a pressão aplicada e a densidade final.

A temperatura de compactação exerce uma função muito importante nas propriedades finais do produto e no consumo energético durante a compactação. A resistência do briquete depende da temperatura de compactação, e a resistência máxima é alcançada com temperaturas em torno de 220 °C (BHATTACHARYA *et al.*, 1989, citados por GONÇALVES, 2010).

Quirino (2002) afirma que a densidade energética do briquete é aproximadamente três vezes maior que o da lenha. Reineke (1964) define que o briquete deve ter resistência elevada para resistir à exposição e aos choques durante o transporte, não sofrendo esmigalhamento, desintegração ou amolecimento durante a combustão. Os briquetes apresentam massa específica entre 1,0 a 1,4 kg/m<sup>3</sup> e diâmetro entre 50-70 mm e comprimento de 50-100 mm e uma estrutura homogênea (CATTANEO, 2003). Naturalmente, essas dimensões dependem da matriz onde o briquete é produzido, podendo alcançar diâmetros até 120-130 mm nos equipamentos industriais.

As propriedades que qualificam um briquete são: poder calorífico superior (PCS), densidade ou massa específica, resistência à compressão, teor de umidade, teor de cinzas, teor de carbono fixo e teor de matéria volátil. Para muitos propósitos, a densidade é o parâmetro de qualidade mais importante (QUIRINO; BRITO, 1991), pois representará a quantidade de energia acumulada no briquete.

Há registros na literatura de que a utilização da tecnologia de raios X na análise de peças de madeira iniciou-se na 2<sup>a</sup> década do século passado, por volta de 1920 (BELINI, *et al.*, 2011). A densitometria de raios X tem sido utilizada para a caracterização de anéis de crescimento, na avaliação tecnológica de painéis de MDF e na caracterização anatômica de madeiras. A técnica possui precisão e praticidade.

Vários autores como Legrand (1946), Lenz (1957), Jacquiot (1961) e Polge (1963), aplicaram a densitometria de raios X para a avaliação quantitativa de propriedades da madeira de diferentes espécies florestais e de produtos à base de madeira. O uso da densitometria de raios X foi ampliado por Parker (1971), quando correlacionou variáveis climáticas com os parâmetros de densidade das árvores (TOMAZELLO FILHO *et al.*, 2008).

Segundo Amaral e Tomazello Filho (1998), com o desenvolvimento de equipamentos e métodos de análise de imagens digitais de filmes radiográficos, mostrou-se possível determinar as variações dos valores de densidade aparente da madeira.

A técnica consiste em obter resposta para irradiação transmitida em várias direções de uma amostra de madeira. Os raios X consistem de uma radiação eletromagnética penetrante e invisível a olho nu e quando a madeira é atravessada por eles, há uma interação entre esta forma de radiação e a madeira. Parte dos fótons de raios X é removida do feixe incidente numa quantidade proporcional à massa específica da madeira, da espessura da amostra e do número de fótons incidentes (SIQUEIRA, 2004).

A partir da obtenção de radiografias de madeiras através de um filme radiográfico, neste se revelará os contrastes entre as zonas de diferentes massas específicas. A maior dificuldade desse procedimento é a obtenção de radiografias bem definidas da madeira (FERRAZ; TOMAZELLO FILHO, 1978).

Segundo Siqueira (2004), o teor de umidade das amostras de madeira afeta a precisão das medições de massa específica na radiografia.

O presente estudo tem por objetivo testar a viabilidade do uso da técnica de densitometria de raios X, já adaptada para a madeira, na avaliação da qualidade de briquetes de resíduos de madeira, permitindo conhecer melhor a distribuição da densidade interna nos briquetes.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Preparação da Matéria Prima

Foi utilizada a madeira da espécie *Eucalyptus* sp., dada sua importância no cenário florestal brasileiro, principalmente no emprego energético. O material em forma de maravalha foi obtido de árvores abatidas em Brasília-DF. As aparas de madeira e o pó de serra foram processados em um moinho de facas. As partículas utilizadas foram classificadas como FINA e GROSSA. A granulometria FINA foi obtida por peneiramento passante na peneira 18 ASTM (partícula menor que 1 mm) e a granulometria GROSSA constituiu o material obtido entre as peneiras 10 ASTM e 3/8" ASTM (partículas entre 2 e 10 mm).

### Confecção dos Briquetes

Os briquetes foram confeccionados, em prensa de compactação de laboratório. Esta prensa

permitiu o controle da temperatura, da pressão e do tempo de aplicação desses parâmetros na compactação dos resíduos.

As temperaturas de compactação utilizadas foram de 130 °C e 200 °C. As pressões para a compactação foram de 53,9 MPa e 82,4 MPa. O tempo de compactação foi de 5 minutos com um resfriamento de 10 minutos com ventilação forçada. Em cada briquete utilizou-se 20 g de partículas, obtendo-se ao final um briquete de aproximadamente 2 cm de comprimento.

Assim, para o delineamento experimental foram confeccionados 48 briquetes, constituindo oito tratamentos (duas granulometrias, duas temperaturas e duas pressões), onde foram produzidos seis briquetes (repetições) para cada tratamento.

Os briquetes foram climatizados em ambiente com umidade e temperatura controlada ( $65 \pm 1\%$  e  $20 \pm 3$  °C, respectivamente) até a massa constante e teor de umidade de aproximadamente 12%. Logo após, três repetições por tratamento foram utilizadas para a determinação das propriedades físicas e mecânicas e as outras três, para a densitometria de raios X.

### Densitometria de Raios X

Da região central de cada um dos três briquetes dos oito tratamentos foram extraídos discos (corpos-de-prova - CP) para a análise de raios X. Os CP foram preparados por meio da utilização de uma lixadeira de disco estacionária, aparelhando as duas extremidades das amostras até que se reduzisse a espessura dos discos para 10 mm. Após uma análise preliminar dos resultados obtidos no aparelho de raios X, lixou-se novamente todas as amostras, reduzindo a espessura para 3 mm.

O espectro densitométrico com o perfil de densidade foi obtido no equipamento QTRS-01X. Os ensaios foram realizados no laboratório da ESALQ/USP.

Primeiramente, os 24 CP foram novamente climatizados em ambiente com umidade e temperatura controlada. Em seguida, as amostras foram posicionados em suporte metálico e transferidos para o compartimento interno blindado do equipamento, seguindo-se a sua calibração e a varredura contínua ao longo de todo o diâmetro da amostra por um feixe de raios X colimado, sendo que a densidade foi determinada ponto a ponto, a cada 40 µm do diâmetro da amostra, segundo procedimento adaptado de Castro (2011).

Os valores obtidos pela digitalização da amostra foram transformados em densidade através do software QMS. Os valores pontuais de densidade originaram um arquivo DAT (relatório de análise com valores pontuais de densidade a cada 40 µm). O arquivo DAT é lido pelo Software Excel, construindo-se os perfis de densidade.

### Propriedades Físicas e Mecânicas

A densidade de cada briquete foi obtida pelo método gravimétrico, que se baseou no cálculo do volume pelo deslocamento de um fluido. Para este estudo, utilizou-se o mercúrio.

O ensaio de Resistência à Compressão Diametral (RCD), que fornece a Carga Máxima de Ruptura (CMR, N/mm) do comprimento do briquete ensaiado, foi realizado para estimar a capacidade de empilhamento de sacos do produto, durante o transporte e armazenamento.

Para o ensaio de determinação da Resistência à Compressão Diametral (RCD), ou seja, na direção perpendicular ao eixo de compactação da biomassa, seguiram-se as recomendações da norma COPANT 466 (30:1-006) (COPANT, 1972). O ensaio foi realizado em uma Máquina Universal de Ensaio EMIC, calibrada com a velocidade de carregamento de 0,3 mm/minuto e a célula de carga utilizada foi de 19,6 kN. Registrou-se, portanto, a Carga Máxima de Ruptura (N) de cada briquete, sendo o valor final da RCD foi dividido pelo comprimento do briquete (mm).

Foram realizados ensaios com 3 repetições de cada um dos 8 tratamentos. Como o formato dos briquetes é cilíndrico, foi utilizada um aplicador de carga constituído de uma chapa metálica com a superfície perfeitamente plana, na geratriz dos briquetes.

### Propriedades Energéticas

Para a análise imediata, o Teor de Matérias Voláteis (TMV%), o Teor de Carbono Fixo (TCF%) e o Teor de Cinzas (TCZ%) foram obtidos conforme a norma ABNT NBR 8112/86 (ABNT, 1986) e o Poder Calorífico Superior-PCS expresso em kcal/kg, foi obtido conforme a norma ABNT NBR 8633/84 (ABNT, 1984).

A Densidade Energética (DE, Mcal/m<sup>3</sup>) dos briquetes foi obtida pelo produto do PCI (obtido pela equação 1) com a densidade dos briquetes.

$$PCI = \frac{[PCS - (25,11 \times H)]}{100 + H} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

PCI = poder calorífico inferior, (kcal/kg);

PCS = poder calorífico superior, (kcal/kg);

H = teor de umidade em base seca, (%).

### Análise Estatística

A análise estatística baseou-se no delineamento experimental inteiramente casualizado, com os oito tratamentos em um esquema fatorial 2 x 2 x 2, com três repetições. O esquema fatorial foi escolhido, pois assim pode-se avaliar ao mesmo tempo, o efeito dos oito tratamentos na qualidade do briquete. Os tratamentos estão descritos na Tabela 1.

**Tabela 1.** Tratamentos avaliados no trabalho em esquema fatorial.

**Table 1.** Evaluated treatments under factor analysis.

Tratamento	Granulometria	Temperatura (°C)	Pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )
1	FINA	130	80 <sup>(1)</sup>
2	FINA	130	120 <sup>(2)</sup>
3	FINA	200	80 <sup>(1)</sup>
4	FINA	200	120 <sup>(2)</sup>
5	GROSSA	130	80 <sup>(1)</sup>
6	GROSSA	130	120 <sup>(2)</sup>
7	GROSSA	200	80 <sup>(1)</sup>
8	GROSSA	200	120 <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Valor obtido pela leitura do manômetro do equipamento e equivale a 53,9 MPa

<sup>(2)</sup> Valor obtido pela leitura do manômetro do equipamento e equivale a 82,4 MPa

Os resultados foram interpretados estatisticamente por meio de análise de variância, sendo que a comparação entre os tratamentos foi analisada por meio do teste F, a 5% de significância. Nas propriedades em que a hipótese nula foi rejeitada, as médias foram comparadas também a 5% de significância pelo teste de Tukey. Para atestar se houve uma relação entre a densidade do briquete e sua resistência (à compressão), foi realizado o teste de Correlação de Pearson, utilizando a densidade obtida pelo método gravimétrico e a Carga de Ruptura por Comprimento do Briquete.

Para comparar o resultado obtido na densitometria de raios X com o resultado de densidade obtida pelo teste gravimétrico, foi utilizado o Teste t de Student, ao nível de significância de 0,05 objetivando verificar se as duas formas de obtenção de densidade de briquetes foram estatisticamente equivalentes. O mesmo teste também foi realizado para comparar as duas granulometrias estudadas. Para as análises, foram utilizados os softwares ASSISTAT versão 7.6 beta de 2011 e o EXCEL versão 2011.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização energética dos materiais constituintes dos briquetes é apresentada na Tabela 2.

Os valores obtidos na análise imediata combinam com aqueles relatados na literatura. Brito e Barrichelo (1978), trabalhando com madeira de oito espécies de eucalipto, obteve: teor de cinza variando de 0,30 a 0,53%; teor de voláteis entre 74,1 e 89,9%; e teor de carbono fixo na faixa de 9,6 a 24,3%. No que se refere ao poder calorífico superior, Quirino *et al.* (2005), estudando 16 espécies de eucalipto, obtiveram valores entre 4501 e 5023 kcal/kg, faixa essa que engloba os resultados encontrados neste estudo.

A Figura 1 ilustra a densidade média encontrada no ensaio gravimétrico para os oito tratamentos. Os tratamentos de 1 a 4 foram se referem à granulometria fina, e os de 5 a 8, à granulometria grossa.

Os briquetes confeccionados com a granulometria FINA apresentaram valores de densi-

dades mais elevados do que os de granulometria GROSSA (Figura 1), justificado pela melhor acomodação das partículas pequenas em relação as grandes.

Observou-se pelo teste de Student que as densidades das duas granulometrias estudadas foram estatisticamente distintas. As Tabelas 3 e 4 da análise estatística comprovam esta informação. Ainda, Quirino (2003) encontrou a mesma tendência para valores de densidade desses tipos de biomassa, com o pó de serra tendo uma densidade de 1,22 g/cm<sup>3</sup> e a maravalha de 1,16 g/cm<sup>3</sup>; corroborando os valores obtidos no presente estudo.

Os valores de densidade dos briquetes de *Eucalyptus* sp. foram consideravelmente mais elevados que os valores de densidade da madeira deste gênero, logo se pôde afirmar que a briquetagem tem influência positiva na densificação, conforme se esperava. Ferreira *et al.* (1979), trabalhando com 4 espécies de eucalipto, obtiveram valores de densidade variando de 0,422 a 0,566 g/cm<sup>3</sup>.

**Tabela 2.** Características energéticas dos briquetes de *Eucalyptus* sp.

**Table 2.** Energetic characteristics of *Eucalyptus* sp wood briquettes.

Propriedades	Matéria Prima
TU, %	8,70
TCZ, %	0,30
TMV, %	81,53
TCF, %	18,17
PCS, kcal/kg	4527
PCI(TU=3,19%), kcal/kg	4309

Onde: TU = Teor de Umidade; TCZ = Teor de Cinzas; TMV = Teor de Matérias Voláteis; TCF = Teor de Carbono Fixo; PCS = Poder Calorífico Superior; e PCI – Poder Calorífico Inferior.

Where: TU = Moisture Content; TCZ = Ash Content; TMV = Volatile Matter Content; TCF = Fixed Carbon Content; PCS = Gross Calorific Value; e PCI – Lower Caloric Value.

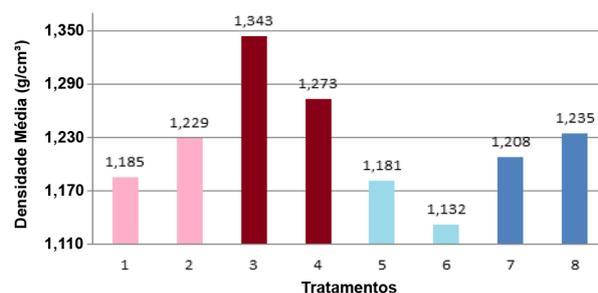
**Tabela 3.** Análise de Variância realizada pelo Software ASSISTAT v. 7.6 beta/2011 a partir de 5% de probabilidade, para as variáveis Granulometria, Temperatura e Pressão.

**Table 3.** Analysis of variance performed by the Software ASSISTAT v. 7.6 beta/2011 starting from 5% of probability for the variables: particle size, temperature and pressure.

FV	GL	SQ	QM	F
Granulometria (F1)	1	0,028290	0,03	6,6*
Temperatura(F2)	1	0,04084	0,04084	9,5314**
Pressão(F3)	1	0,00089	0,00089	0,2073 <sup>ns</sup>
Int. F1x F2	1	0,00194	0,00194	0,4537 <sup>ns</sup>
Int. F1x F3	1	0,00001	0,00001	0,0014 <sup>ns</sup>
Int. F2x F3	1	0,00058	0,00058	0,1354 <sup>ns</sup>
Int. F1x2x3	1	0,01363	0,01363	3,1818 <sup>ns</sup>
Tratamentos	7	0,08618	0,01230	2,8734 <sup>ns</sup>
Resíduo	16	0,06855	0,00430	
Total	23	0,15473		

Onde: (\*\*) = significativo ao nível de 1% de probabilidade; (\*) = significativo ao nível de 5% de probabilidade; e (ns) = não significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Where: (\*\*) = significant at a probability of 1%; (\*) = significant at 5% of probability; e (ns) = not significant at 5% of probability level.



**Figura 1.** Valores das densidades médias (g/cm<sup>3</sup>) dos briquetes de *Eucalyptus* sp, observada por deslocamento de mercúrio para os oito tratamentos de compactação.

**Figure 1.** Mean values bulk density (g/cm<sup>3</sup>) of *Eucalyptus* sp. wood briquettes, after mercury displacement to the compaction treatments.

**Tabela 4.** Teste de Tukey para o nível de 5% de significância para os parâmetros de compactação: Granulometria, Temperatura e Pressão.

**Table 4.** Tukey test for 5% level of significance for the compaction parameters: particle size, temperature and pressure.

Médias e Medidas					
Medidas da Granulometria		Medidas de Temperatura		Médias de Pressão	
Fina	1.25775 a	130 °C	1.18217 b	80(1) kgf/cm <sup>2</sup>	1.22950 a
Grossa	1.18908 b	200 °C	1.26467 a	120(2) kgf/cm <sup>2</sup>	1.21733 a
Dms = 0,05669		Dms = 0.05669		Dms = 0.05669	

Dms = diferença mínima significativa.

<sup>(1)</sup> Valor obtido pela leitura do manômetro do equipamento e equivale a 53,9 MPa

<sup>(2)</sup> Valor obtido pela leitura do manômetro do equipamento e equivale a 82,4 MPa

Com temperatura de prensagem mais elevada (200 °C), obteve-se briquetes com densidades ainda mais elevadas, como se observa na Figura 1. Com granulometria mais fina também foram obtidas densidades geralmente mais elevadas. Isso se deve também a uma maior transição plástica com a biomassa compactada em temperatura maior.

Quando se comparou a densidade dos briquetes com a carga de ruptura no ensaio de compressão diametral, encontrou-se uma relação direta. Assim, quanto maior a densidade do briquete maior a sua resistência à compressão diametral (Tabela 5). O teste de correlação de Pearson mostrou uma relação fortemente positiva, com um coeficiente de correlação de 0,86, confirmando que a densidade é um parâmetro muito importante, na análise da qualidade dos briquetes.

A densidade energética dos briquetes demonstra a importância da densificação no processo de compactação. Os briquetes mais densos (tratamentos 3, 4, 7 e 8) apresentam as maiores densidades energéticas.

A densitometria de raios X gerou o perfil densitométrico dos compactados, permitindo observar a variação da massa específica entre o centro dos briquetes e a sua região periférica.

A primeira iniciativa para avaliar a sensibilidade da densitometria de raios X, foi comparar a densidade média das amostras de briquetes obtidas pelo processo gravimétrico (volume em mercúrio), com as médias das massas específicas obtidas pela densitometria de raios X. Foi aplicado a densitometria em amostras de 10 mm e de 3 mm de espessura. A Tabela 6 ilustra esta comparação.

**Tabela 5.** Valores médios da Resistência à Compressão Diametral, Densidade Aparente obtida pelo método gravimétrico e Densidade Energética dos briquetes de *Eucalyptus* sp.

**Table 5.** Mean values of Diametric Compressive Strength and Bulk Density observed by mercury displacement and Energetic Density of *Eucalyptus* sp. waste wood briquettes.

Tratamento	RCD (kgf/mm)	DA (g/cm <sup>3</sup> )	DE (Mcal/m <sup>3</sup> )
1	18,83	1,185	5107
2	22,64	1,229	5297
3	44,12	1,343	5788
4	48,12	1,273	5483
5	13,68	1,181	5090
6	14,87	1,132	4878
7	16,34	1,208	5203
8	22,78	1,235	5320

Onde: RCD = Resistência à Compressão Diametral; DA = Densidade Aparente; e DE = Densidade Energética com TU = 3,19%.

Where: Diametric Compressive Strength; DA = Bulk Density; DE = Energetic Density.

**Tabela 6.** Comparação entre os métodos de obtenção da densidade aparente dos briquetes: deslocamento de mercúrio (gravimétrico) e densitometria de raios X com comprimento do briquete de 10 e 3 mm.

**Table 6.** Comparison of the methods for obtaining the briquettes bulk density: mercury displacement (gravimetric) and X-ray densitometry of briquette length of 10 and 3 mm.

Tratamentos	Métodos de Determinação da Densidade (g/cm <sup>3</sup> )		
	Gravimétrico	Raios X (10 mm)	Raios X (3 mm)
1	1,208	0,739	1,081
2	1,254	0,752	0,992
3	1,336	0,815	1,086
4	1,353	0,823	1,113
5	1,186	0,767	1,224
6	1,082	0,774	0,863
7	1,150	0,779	1,039
8	1,170	0,787	1,089

Observou-se que a densidade obtida com amostras de 3 mm de espessura se encontra próxima da densidade do briquete obtida por medição direta, ou seja, pelo processo gravimétrico, que foi considerado como padrão. Este fato sugeriu que as amostras de briquetes para densitometria de raios X deveriam apresentar a espessura mais próxima desse valor.

Além de permitir a obtenção da densidade dos compactados, a densitometria de raios X apresenta o perfil densitométrico ao longo do diâmetro das amostras de briquetes, ou seja, a variação da massa específica ao longo do diâmetro do briquete.

No entanto, os perfis densitométricos obtidos com as amostras de 10 mm de espessura, conforme ilustra a Figura 2, combinam melhor com as zonas de fratura de briquetes rompidos durante o processo de compactação/resfriamento, conforme mostra a Figura 3. Este sistema de fratura, em forma de anel, define uma zona central diferenciada da borda do briquete, parecendo delimitar uma parte central do briquete de menor densidade, em relação à parte externa do briquete que é mais densa. O perfil densitométrico mostrado na Figura 2, foi obtido ao longo do diâmetro do briquete conforme ilustra a Figura 2, onde na parte superior, ilustra a foto da região diametral do briquete e a parte inferior corresponde ao espectro da densitometria. Entende-se que esta diferenciação da compactação interna no briquete se deve a variação da temperatura interna no briquete e também variação da pressão interna.

A Figura 3 resume o perfil densitométrico observado para os 8 tratamentos dos compactados do presente estudo com as amostras de 10mm de espessura.

A Figura 4 é referente ao perfil densitométrico com 4 tratamentos com amostras de 3mm de espessura. Apesar de os perfis densitométricos não definirem bem a região de menor densidade, as densidades médias dos briquetes, obtidas pelo método gravimétrico, estão mais próximas das massas específicas médias obtidas pela densitometria de raios X com os CP de 3 mm. Indicando que se deve adotar espessuras menores das amostras em ensaios de densitometria de briquetes.

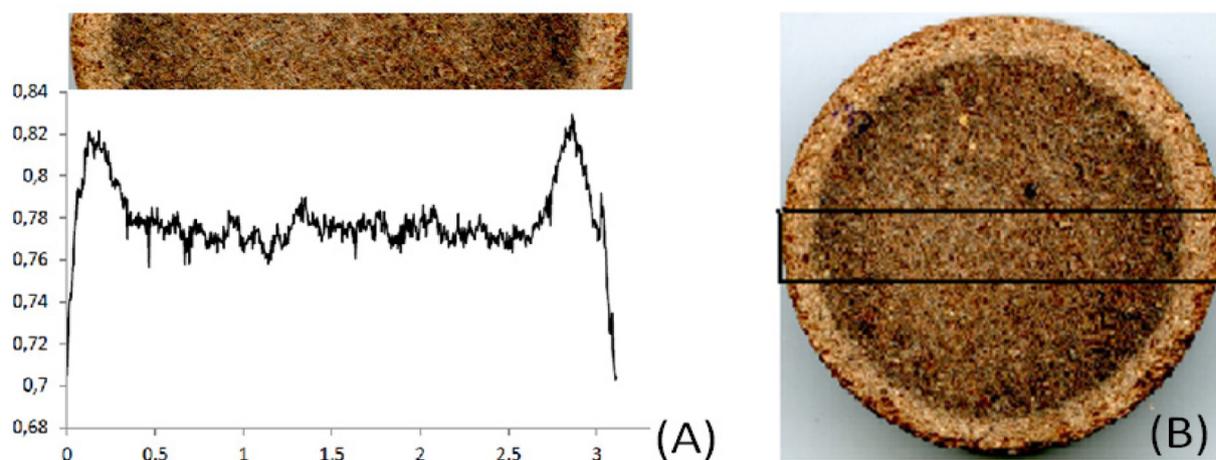
As amostras de 3 mm, apesar de fornecerem um valor de massa específica média mais próxima da densidade do briquete, não produziram um perfil densitométrico bem definido. Isso se deve à dificuldade em produzir amostras de

pequena espessura, o que ocasionou superfícies imperfeitas e não muito paralelas, prejudicando as medidas densitométricas. recomenda-se assim, que sejam efetuados pequenos ajustes na sensibilidade do aparelho para leitura em amostras de briquetes. Comprovou-se mais uma vez que a composição dos briquetes, constituem-se de partículas de tamanho heterogêneo, favorecendo dessa maneira um densificação também heterogênea. Observou-se também que a fratura ocorreu em uma região de menor resistência mecânica (Figura 5), onde a massa específica é mais baixa. Esse comportamento é observado nos perfis correspondentes aos tratamentos com temperatura elevada de compactação (200 °C). Todos os briquetes apresentaram diminuição no valor da densidade no mesmo local, aproximadamente a 5 mm das bordas.

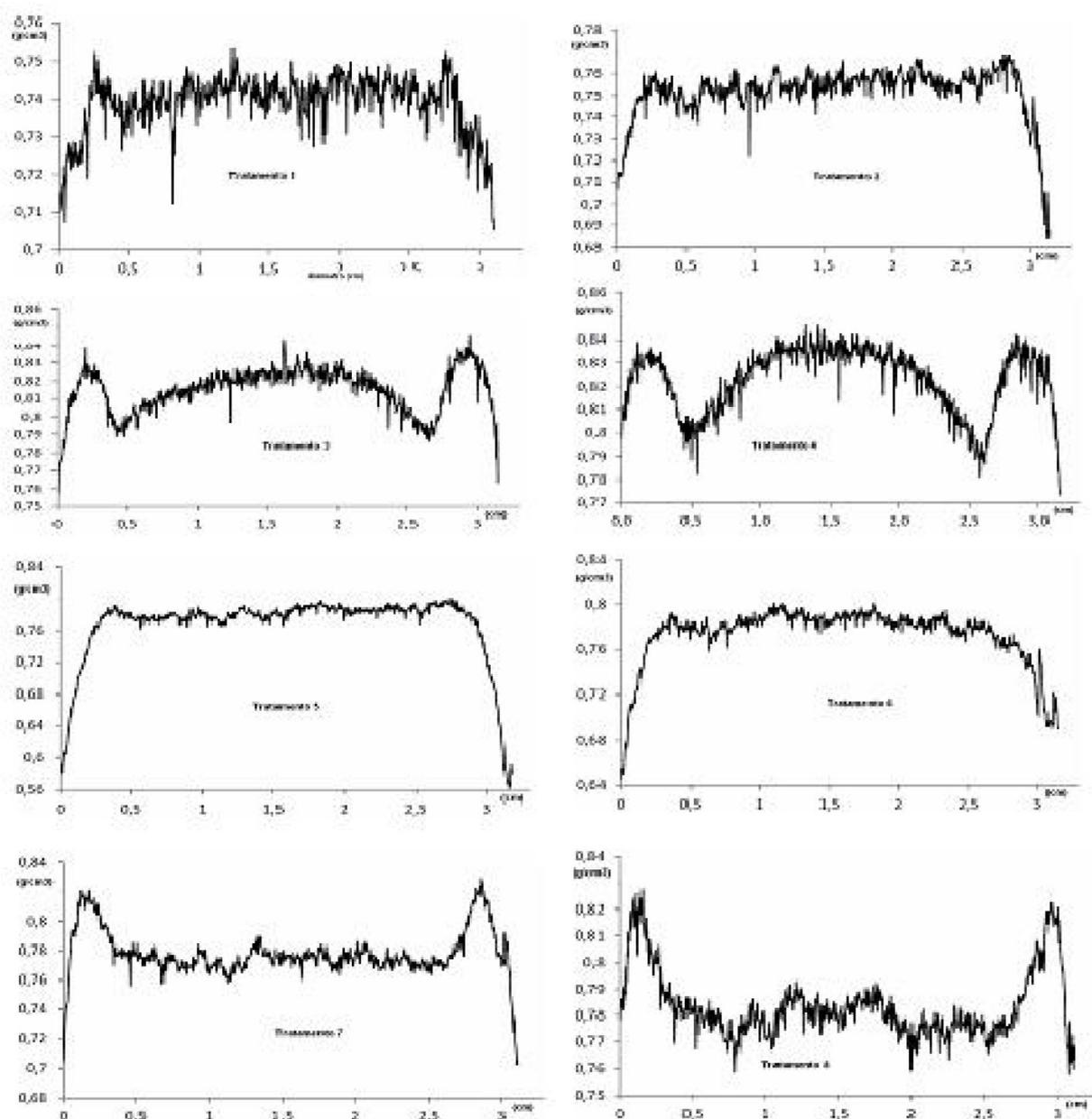
Ao realizar o teste t de Student para comparar as três formas de obtenção de densidade, observou-se que: (1) os resultados de densidade do método gravimétrico e da massa específica pela densitometria de raios X com amostras de 10 mm são significativamente diferentes; (2) os resultados de densidade aparente do método gravimétrico e massa específica pela densitometria de raios X com amostras de 3 mm são significativamente diferentes; (3) os resultados de massa específica da densitometria de raios X com amostra de 10 mm e 3 mm são significativamente diferentes entre si.

Os resultados encontrados corroboram aqueles obtidos por Bhattacharya *et al* (1989), citado por Gonçalves (2010), onde se discutiu a influência da temperatura de compactação nas propriedades finais do produto, assim como em sua resistência à compressão. Logo, com maiores temperaturas de compactação, maiores serão as densidades e também a resistência à ruptura em compressão diametral. Os resultados do presente estudo corroboraram essa tendência descrita pelos autores mencionados.

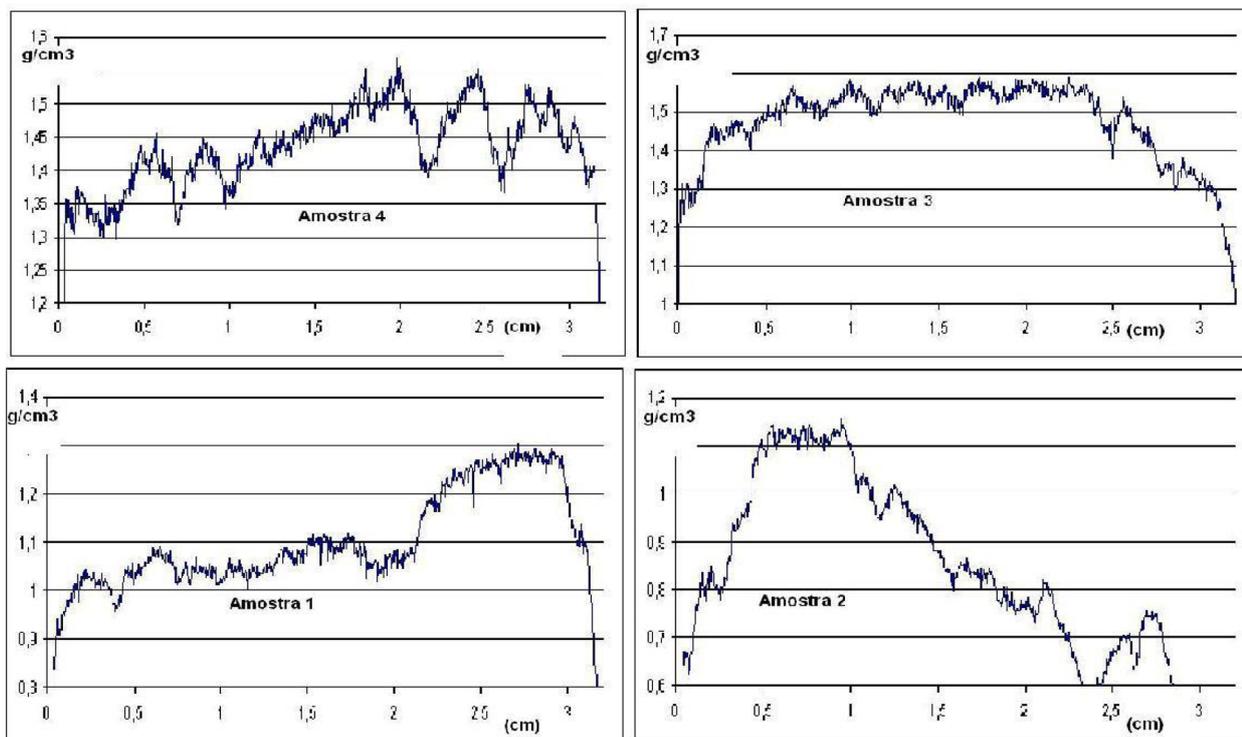
O perfil de massa específica obtido pela densitometria de raios X permitiu avaliar os efeitos da densificação na qualidade interna dos briquetes, principalmente a variação da massa específica. Aplicado na análise de qualidade de briquetes pode ajudar a definir como os fatores da briquetagem (temperatura, pressão, tempo de prensagem e granulometria) serão administrados na fabricação de briquetes para os quais se buscam características melhoradas (Figura 4).



**Figura 2.** Perfil densitométrico da zona diametral (A) obtido em briquetes com 10 mm de comprimento (B).  
**Figure 2.** Densitometry profile of the diametral zone (A), obtained into briquettes with 10 mm (B).



**Figura 3.** Perfil densitométrico médio da zona diametral de briquetes confeccionados com partículas de *Eucalyptus* sp. para todos os oito tratamentos com amostras de espessura 10 mm.  
**Figure 3.** Densitometry profile at a diametral zone of briquettes made with *Eucalyptus* sp. particles, for all eight treatments of sample with thickness 10mm.



**Figura 4.** Perfil densitométrico médio da zona diametral de briquetes confeccionados com partículas de *Eucalyptus* sp. para todos os quatro tratamentos com amostras de espessura 3 mm.

**Figure 4.** Densitometry profile at a diametral zone of briquettes made with *Eucalyptus* sp. particles, for all four treatments of sample with thickness 3mm.



**Figura 5.** Briquete fraturado durante processo de compactação e resfriamento, mostrando duas regiões de consistência diferenciadas e concêntricas.

**Figure 5.** Briquette fractured during compaction process and cooling, showing the different regions of consistency and concentric.

## CONCLUSÃO

A partir dos ensaios realizados com densitometria de raios X concluiu-se que: a massa específica interna não é homogênea ao longo do diâmetro do briquete; a densitometria de raios X permitiu a compreensão desse fenômeno. Acredita-se desta forma, ser possível melhorar o processo industrial de fabricação dos briquetes.

Dessa forma, a análise densitométrica de raios X, aplicada a briquetes, se mostra um método promissor para análise da qualidade de briquetes de resíduos de madeira. No entanto, muitos outros ensaios e ajustes, como a variação dimensional dos corpos-de-prova, devem ser efetuados para validação dessa metodologia aplicada em briquetes de biomassa.

Confirmou-se mais uma vez a importância dos parâmetros do processo de compactação na qualidade final do briquete, ou seja, na sua densidade energética e resistência à compressão diametral, como a granulometria da biomassa e a temperatura de compactação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112 – Carvão Vegetal – Análise Imediata**. Rio de Janeiro, 1986.
- \_\_\_\_\_. **NBR 8633 – Carvão Vegetal – Determinação do poder calorífico**. Rio de Janeiro, 1984.
- AMARAL, A.C.B.; TOMAZELLO FILHO, M. Avaliação das características dos anéis de crescimento de *Pinus taeda* pela microdensitometria de raios X. **Revista Ciência e Tecnologia**, Piracicaba, v.6, n.11, p.17-23, 1998.
- BELINI, U.L.; TOMAZELLO FILHO, M.; CASTRO, V.R.; MUNIZ, G.I.B.; LASSO, P.R.O. ; VAZ, C.M.P. - Microtomografia de raios X (micro CT) aplicada na caracterização anatômica da madeira de folhosas e coníferas. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro. v.18, n.1, p.30-36, 2011.
- BRITO, J.O. ; BARRICHELO, L.E.G. Características do Eucalipto Como Combustível: Análise Química Imediata da Madeira e da Casca. **IPEF**, Piracicaba, n.16, p.63-70, 1978.
- CASTRO, V.R. **Aplicação de métodos modernos não destrutivos de caracterização da estrutura anatômica e das propriedades físicas do lenho de árvores em pé: espécies nativas e introduzidas em plantações florestais**. 2011. 106p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.
- CATTANEO, D. **Briquetting: a forgotten opportunity**. Brescia: University of Brescia, 2003.
- COPANT - COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. **Copant 466 - Maderas: método de determinación de la compresión perpendicular al grano**. La Paz, 1972.
- ERIKSSON, S.; PRIOR, M. **The briquetting of agricultural wastes for fuel**. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1990.
- FELFLI, F.F.; MESA P, JUAN M.; ROCHA, J.D.; FILIPPETTO, D.; LUENGO, C.A.; PIPPO, W. A. Biomass briquetting and its perspectives in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.35, n.1, p. 2011.
- FERRAZ, E.S.B.; TOMAZELLO FILHO, M. Uso de métodos nucleares nos estudos da qualidade da madeira. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 3., 1978, Manaus. **Anais...** Manaus: Ed. SBS, 1978.
- FERREIRA, C. A. ; FREITAS, M. ; FERREIRA, M. . Densidade básica da madeira de plantações comerciais de eucaliptos na região de Mogi-Guaçu - SP. **IPEF**, Piracicaba, n.18, p.106-117, 1979.
- FILIPPETTO, D. **Briquetagem de resíduos vegetais: viabilidade técnico-econômica e potencial de mercado**. 2008. 74p. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.
- GONÇALVES, J.E. **Avaliação energética e ambiental de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis***. 2010. 104p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Botucatu, 2010.
- JACQUIOT, C. .L'utilisation des rayons X dans les recherches et les essais sur les insectes xylophages. **Corrosion et anticorrosion**, v.9, n.3, p.71-79. 1961
- LEGRAND, C. .Sur quelques applications des rayons X á l'étude des bois et leurs derives. In. CONGRÈS INTERNATIONAL POUR L'EXPLOITATION ET L'UTILISATION RATIONELLES DU BOIS. 1946, Paris. **Annals...** Paris: IPER, 1976. p.29-31.
- LENZ, O. L'utilisation de la radiographie pour l'examen des couches d'accroissement. **Mitteilungen**, Paris, v.33, n.5, p.15-23, 1957.
- PARKER, M.L. **Dendrochronological techniques used by the Geological Survey of Canada**. Ottawa: Dept. of Energy, Mines and resources, 1971. 71p.
- POLGE, H. .Une nouvelle méthode de détermination de la texture du bois: l'analyse densitométrique de clichés radiographiques. **Annales des Sciences Forestières**, v.20,n.4, p.531-581, 1963.
- QUIRINO, W.F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. 2002. Disponível em: <<http://www.mundoflorestal.com.br/arquivos/aproveitamento.pdf>> . Acesso em 08 set. 2012.

- QUIRINO, W.F.; BRITO, J.O. **Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal**. Brasília: IBAMA / LPF- Laboratório de Produtos Florestais, 1991. (Série Técnica, n.13).
- 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 ligno-celulósicos. **Revista da Madeira**, Curitiba, v.15, n.89, p.100-106, 2005.
- REINEKE, L. H. **Briquets from wood residue**. Madison: Forest Products Laboratory, Forest Service, 1964.
- SILVEIRA, M.S. **Aproveitamento das cascas de coco verde para produção de briquete em salvador – BA**. 2008. 163p. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2008.
- SIQUEIRA, K.P. **Variabilidade da massa específica de *Pinus taeda* L. em diferentes classes de sítio**. 2004. 43p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- TOMAZELLO FILHO, M.; BRAZOLIN, S; CHAGAS, M.P.; OLIVEIRA, J.T.S.; BALLARIN, A.W.; BENJAMIN, C.A. Application of X-ray technique in nondestructive evaluation of eucalypt wood. **Maderas, Ciencia y Tecnologia**, Concepcion, v.10, n.2, p.139-149, 2008.

Recebido em 29/05/2011  
Aceito para publicação em 11/10/2012