Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Estudo da biomassa torrada de resíduos florestais de eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos

Juliana Rodrigues Siviero dos Santos

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em: Tecnologia de Produtos Florestais

Piracicaba
2012

Juliana Rodrigues Siviero dos Santos
Engenheiro Florestal

Estudo da biomassa torrada de resíduos florestais de eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 5890 de 2010

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ OTÁVIO BRITO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em: Tecnologia de Produtos Florestais

Piracicaba
2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP

Santos, Juliana Rodrigues Siviero dos
Estudo da biomassa torrada de resíduos florestais de eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos / Juliana Rodrigues Siviero dos Santos. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 5890 de 2010. - - Piracicaba, 2012.
85 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2012.

1. Bagaço 2. Biomassa - Tratamento térmico 3. Cana-de-açucar 4. Energia renovável 5. Eucalipto 6. Granulometria 7. Recursos florestais 8.Torrefação I. Título

CDD 634.98
S237e

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

AGRADECIMENTOS

À Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – ESALQ/USP pela formação acadêmica e oportunidade oferecida.

José Otávio Brito pela longa e valiosa orientação e amizade.

Udemilson Luís Ceribelli, Raquel Silveira Ramos Almeida e Maria Regina Buch pelo apoio nas análises laboratoriais.

Ana Lúcia M. Pincelli pelo apoio, incentivo e amizade.

Patrick Perré e Giana Almeida pelo apoio nas realizações das análises no LERMAB.

Duratex e Cosan pelo fornecimento do material usado no presente estudo.

Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo/FAPESP pela concessão da bolsa de estudos durante a realização da pesquisa.

V&M Florestal, especialmente Hélder Bolognani pelo apoio e oportunidade.

Aos meus pais, Luíz e Claudete, vó Rosa e toda a família pelo amor, apoio e incentivo.

Tiago pelo companheirismo, apoio e paciência.

Daniela, Flora, Rodrigo, Tiago e Tito pela inestimável amizade.

Todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

“Aquele que recebe de mim uma ideia
tem aumentada a sua instrução
sem que eu tenha diminuído a minha.
Como aquele que acende sua vela na minha
recebe luz sem apagar a minha vela.”

Thomas Jefferson

SUMÁRIO

RESUMO 9
ABSTRACT 11
1 INTRODUÇÃO 13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 15
2.1 Biomassa energética 15
2.2 Bagaço de cana-de-açúcar 18
2.3 Resíduos florestais 19
2.4 Tratamento térmico da biomassa – Torrefação 20
3 OBJETIVOS 23
4 MATERIAL E MÉTODOS 25
4.1 Material 25
4.1.1 Resíduos de eucalipto 25
4.1.2 Bagaço de cana-de-açúcar 28
4.2 Métodos 28
4.2.1 Torrefação da biomassa 29
4.2.2 Rendimento do tratamento térmico 31
4.2.3 Análises e determinações 32
4.2.4 Termogravimetria 32
4.2.5 Friabilidade 35
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 37
5.1 Torrefação da biomassa 37
5.2 Lignina e extrativos 42
5.3 Análise imediata 45
5.4 Poder calorífico superior 49
5.5 Termogravimetria 51
5.5 Friabilidade 54
6 CONCLUSÕES 63
REFERÊNCIAS 65
ANEXOS 69

RESUMO

Estudo da biomassa torrada de resíduos florestais de eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos

O presente estudo teve como objetivo geral avaliar o efeito da aplicação do tratamento térmico – torrefação - com diferentes intensidades em resíduos florestais de *Eucalyptus grandis* e bagaço de cana-de-açúcar como proposta para a melhoria de suas características visando o uso como combustível. As biomassas foram submetidas a torrefação laboratorial compreendendo temperaturas de 250 e 280°C, além dos tempos de residência na temperatura de tratamento de 0,5 e 2,0 horas. Em seguida, para a avaliação do efeito do tratamento térmico nos materiais, as biomassas originais e as torradas foram submetidas às seguintes avaliações laboratoriais: composição química (teor de lignina e extrativos), composição imediata através da determinação dos teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas, poder calorífico, termogravimetria, granulometria e friabilidade. Os resultados mostraram que existe influência da temperatura no rendimento das biomassas analisadas. De modo geral, quanto maior a temperatura do tratamento térmico, menor o rendimento obtido e, consequentemente, maior a perda de massa para ambas as biomassas. Houve incremento no teor de carbono fixo, redução do teor de materiais voláteis e aumento no teor de cinzas para ambas as biomassas. Os dois materiais apresentaram, de modo geral, comportamentos muito semelhantes em relação a composição química. Foi observado que o aumento da intensidade do tratamento térmico ocasionou tendência de aumento no teor de lignina dos materiais. Observou-se também que a torrefação exerceu influência na redução da granulometria e aumento da friabilidade tanto dos resíduos florestais de *Eucalyptus grandis* quanto no bagaço de cana-de-açúcar.

Palavras-chave: Tratamento térmico; Biomassa; Aplicação energética; Granulometria

ABSTRACT

Study of eucalyptus forest residues and sugar cane bagasse torrefied biomass for energy purposes

The objective of this study was to analyze the effect of the heat treatment application, with different intensities in forest residues of *Eucalyptus grandis* and sugar cane bagasse in order to improve its features to use as fuel. The biomasses were subjected to laboratory heat treatments comprising temperatures of 250 and 280°C during 0,5 and 2,0 hours. After that, the original and treated biomasses were subjected to laboratory tests including: chemical composition (lignin and extractives), immediate composition by determining the levels of volatiles, fixed carbon and ash, calorific value, thermogravimetry, grain size and friability. The results show that there is an influence of temperature on the yields of biomass analyzed. In general, the treatments with higher temperatures present lower yield. There was an increase in fixed carbon content, reducing the volatile components and ash content increased for both biomasses. The two materials showed very similar behavior on chemical composition. The increase of the intensity of heat treatment caused an increase in lignin content of the materials. It was possible to observe that the heat treatment presented an influence on particle size reduction and increases friability in both the forest residues of *Eucalyptus grandis* and sugar cane bagasse.

Keywords: Heat treatment; Biomass; Energy application; Granulometry

1 INTRODUÇÃO

É cada vez maior a consciência da necessidade de investimento em fontes de energia renovável para estas aumentarem suas participações na matriz energética mundial. Além disso, a atual sociedade mundial apresenta-se muito dependente dos combustíveis derivados do petróleo, e na iminência de um colapso desses combustíveis fósseis, as fontes alternativas de energia mostram-se como uma alternativa cada vez mais promissora principalmente por possuir caráter renovável.

É nesse contexto desafiador de buscar soluções para o uso racional e eficiente dos recursos naturais que a biomassa vegetal ganha papel de destaque por apresentar-se como a fonte de energia renovável mais abundante e explorada do planeta.

O Brasil destaca-se nesse cenário, pois possui grandes fontes de biomassa vegetal, com destaque para o bagaço de cana-de-açúcar proveniente da produção de etanol e açúcar e os resíduos do setor florestal. A geração desses resíduos inicia-se com o abate e processamento das toras ainda no campo, passa pelo beneficiamento e estende-se até o uso final da madeira.

Essa biomassa pode ser utilizada de forma direta, através da combustão, ou de forma indireta, por meio de processos de conversão para a produção de combustíveis com maior concentração de energia. Tais combustíveis podem ser sólidos, líquidos ou gasosos, dependendo do uso final que se pretende fazer. Para que o uso energético da biomassa seja otimizado, é importante que suas características sejam melhoradas e homogeneizadas a partir de alterações em suas propriedades e para isso, o tratamento térmico é uma alternativa.

O tratamento térmico causa alterações químicas e físicas na biomassa como o aumento da sua concentração energética, em geral, pelo aumento na concentração de carbono. O produto resultante do tratamento térmico denominado torrefação, que ocorre em temperaturas de até 280°C, é a biomassa torrada que pode ser entendida como um material intermediário entre o material “in natura” e o carvão vegetal.

Pode-se dizer, portanto, que o tratamento térmico é uma alternativa potencial de concentração energética da biomassa, particularmente considerando-se os resíduos florestais e o bagaço de cana-de-açúcar.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Biomassa energética

O uso do termo passou a ganhar maior importância por volta de 1975, para descrever os materiais naturais que podem ser utilizados como combustível. A definição inclui toda matéria orgânica de origem vegetal ou animal, inclusive os materiais procedentes de sua transformação natural ou artificial. Em seu conceito mais amplo, abrange toda a matéria viva existente num dado momento na Terra. Qualquer tipo de biomassa provém, em última instância, do processo de conversão fotossintética. A biomassa energética engloba todos aqueles materiais que são passíveis de serem utilizados para fins energéticos. Ela é uma fonte de energia renovável, resultante do armazenamento da energia solar nas plantas. Por meio da fotossíntese, as plantas convertem o CO_2 (dióxido de carbono) da atmosfera nos compostos orgânicos usados em seu crescimento. A energia química armazenada nas plantas e nos animais (que se alimentam de plantas e outros animais), ou em seus resíduos, é chamada bioenergia. Essa energia contida na planta pode ser recuperada mediante vários processos, dos quais o mais simples é a combustão (MESA PÉREZ, 2004).

No ciclo natural da vida, a biomassa vegetal se decompõe em suas moléculas elementares, liberando também calor. Dessa forma, a liberação de energia pela conversão dessa biomassa reproduz a decomposição natural, mas de um modo mais rápido, e essa energia é formada de energia renovável. Sua utilização permite a reciclagem do carbono e não se adiciona CO_2 à atmosfera, ao contrário do que acontece com os combustíveis fósseis. De todas as formas de energia renovável, a biomassa vegetal é a principal que efetivamente armazena a energia solar. Além disso, é a principal fonte renovável de carbono e pode ser empregada na produção de combustíveis sólidos, líquidos e gasosos (PINHEIRO et al., 2001).

Dentre os recursos renováveis, a biomassa vegetal tem gerado grande interesse da comunidade científica, pois além de ser uma importante fonte de energia renovável, devido principalmente a sua abundância e baixo custo, as possibilidades de melhoria e utilização do seu potencial energético são muito amplas e promissoras.

De acordo com Clementino (2001), a existência de uma forte relação entre energia e ambiente com o modelo de desenvolvimento da humanidade tem resultado numa demanda por uma mudança no atual modelo energético, que incorpora, dentre outras ações, maior utilização de tecnologias eficientes, com ênfase ao uso de fontes renováveis.

As fontes de energias renováveis possuem grande importância por serem consideradas alternativas sustentáveis e, principalmente, por possibilitarem reduzir o uso de produtos derivados do petróleo e, consequentemente, a dependência energética dos países consumidores em relação aos produtores e exportadores de petróleo e seus derivados.

O uso da biomassa como fonte de energia é cada vez mais frequente e promissor, pois essa é a mais abundante das energias renováveis e, além disso, possui ciclo fechado de carbono, reduz emissões de CO_2 e outros produtos nocivos ao ambiente. A médio e longo prazo, a exaustão de fontes não-renováveis e as pressões ambientais poderão acarretar maior aproveitamento energético da biomassa. Atualmente a biomassa vem sendo cada vez mais utilizada na geração de eletricidade, principalmente em sistemas de cogeração e no suprimento de eletricidade para demandas isoladas da rede elétrica (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2009).

No Brasil existe uma grande participação dos recursos renováveis como fonte de energia. De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2011, no ano de 2010 a participação dos recursos renováveis na oferta interna de energia foi de 45,4%, dos quais 9,6% foi oriunda de lenha e carvão vegetal e 17,7% de produtos da cana-de-açúcar, como pode ser observado na figura 1. Para efeito comparativo, ainda de acordo com o Balanço Energético Nacional, a biomassa tem uma participação de 10,7% na oferta interna de energia mundial.

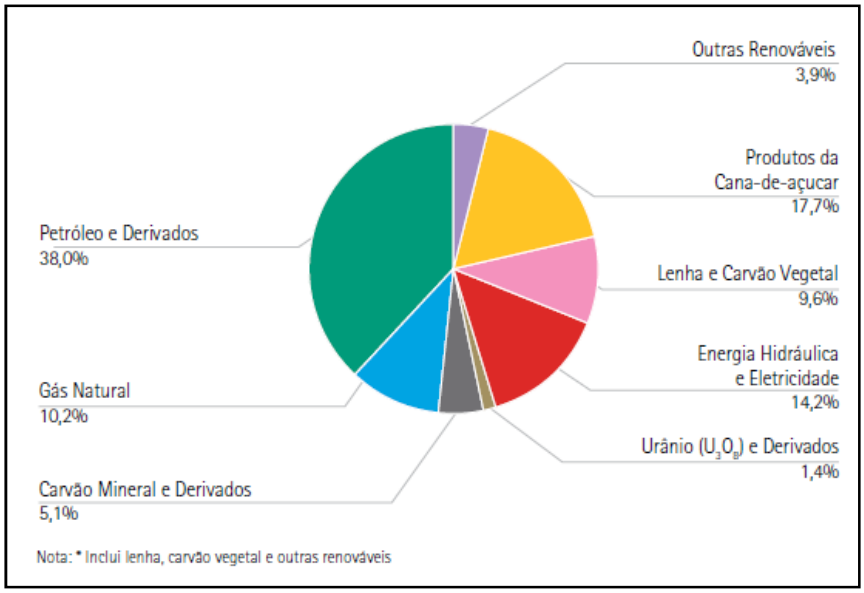

Figura 1- Balanço Energético Nacional e as participações dos diversos tipos de fontes de energia
Fonte: Balanço Energético Nacional 2010

Porém, para garantir que o seu uso como fonte de energia seja ambientalmente correto e viável economicamente, é necessário realizar modificações nessa biomassa para melhorar sua concentração de energia, além da homogeneidade de suas propriedades (ALMEIDA; BRITO; PERRÉ, 2010).

Algumas propriedades energéticas são importantes, pois determinarão seu uso como combustível. Dentre elas está a composição química imediata e molecular além do poder calorífico. Existem também outras propriedades que não são propriamente energéticas, mas são de grande importância para a avaliação da biomassa como combustível, como é o caso da friabilidade, ao se pensar na hipótese da sua moagem.

A análise da composição química molecular da biomassa vegetal apresenta três tipos particulares de moléculas: celulose, hemiceluloses e lignina. Já, a composição química imediata denota o teor de umidade, de materiais voláteis, de cinzas e de carbono fixo da madeira. Os materiais voláteis são os componentes desprendidos no início da combustão, sendo composto principalmente por hidrogênio, hidrocarbonetos, monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO_2). As cinzas são óxidos minerais remanescentes da combustão total da madeira. O carbono fixo apresenta a diferença da massa total de madeira e do somatório dos teores de matérias voláteis e das cinzas. Sabe-se que o aumento gradual da temperatura elimina os componentes voláteis da biomassa vegetal e o carbono restante responsável pela formação da massa amorfa permanece “fixo” (GOMES; OLIVEIRA, 1980).

O poder calorífico pode ser entendido como a energia desprendida pela queima de uma unidade de massa de um combustível, e é expresso em calorias ou joules por grama. O poder calorífico é dito superior (PCS) quando a combustão se efetua a volume constante e a água formada na combustão é condensada. Sabe-se que a madeira apresenta valores de PCS em torno de 4.500 kcal/kg (KOLLMAN; CÔTÉ, 1968). Já o poder calorífico inferior (PCI) é resultante da combustão sob pressão constante, ao ar livre, sem a condensação da água formada (DOAT, 1977), e desse modo, seu valor é menor que o PCS.

A friabilidade é definida como a capacidade do combustível sólido em gerar finos quando submetido à abrasão ou queda, fragmentar-se em pedaços menores. Esta propriedade tem maior relação com o carvão vegetal, por se tratar de material bastante friável, que pode apresentar até 25% de sua massa convertida em material fino. A friabilidade é uma característica importante também para análise dos combustíveis lignocelulósicos que precisam ser cominuídos para a utilização energética.

2.2 Bagaço de cana-de-açúcar

O bagaço é o resíduo fibroso obtido da moagem da cana, quando esta é usada para obtenção de álcool e açúcar. O bagaço obtido deste processo representa, aproximadamente, 30% da massa do vegetal, com umidade em torno de 50% (MACHADO, 2000). Ele é, sem dúvida, o resíduo agroindustrial obtido em maior quantidade no Brasil, estimando-se que, anualmente, sejam produzidos de 5 a 12 milhões de toneladas desse material (SANTOS, 2005).

Anteriormente o bagaço era considerado um resíduo incômodo, tem sido usado para geração de energia desde longa data, com tal destinação se tornando cada vez mais significativa para o mercado (EID et al., 1998). Sua importância é ainda considerada mais forte para o nosso país por estar disponível em períodos de menor oferta de energia hidrelétrica, (MACHADO; LIMA, 2002).

Desde o início desse século, o bagaço-de-cana tem sido usado como combustível nas usinas sucroalcooleiras, quando passou a substituir a lenha nas caldeiras. Os principais pontos positivos que viabilizam os investimentos em cogeração de energia elétrica são: posição geográfica das usinas e período de safra. As usinas de cana estão localizadas na área de maior consumo de cana-de-açúcar do país e o período de colheita coincide com a seca, poupando os reservatórios das hidrelétricas (PELLEGRINI, 2002).

De acordo com Ernesto (2009), a maior experiência de produção de energia com biomassa é a queima do bagaço de cana nas caldeiras de usinas, cuja eficiência poderia aumentar em 35% com a gaseificação ou redução de sua umidade, que chega a 50%.

Entre as diversas formas de aproveitamento do bagaço de cana, destaca-se o seu valor como combustível em substituição aos derivados de petróleo, especialmente óleo combustível e lenha. O bagaço proporciona às empresas sucroalcooleiras o privilégio da auto-suficiência de energia térmica e da possibilidade de auto-suficiência em energia elétrica, condições essas inexistentes na maioria das atividades industriais (PELLEGRINI, 2002).

De acordo com Santos (2011), na safra 2006/2007 o Brasil moeu 458 milhões de toneladas de cana-de-açúcar; o que corresponde a 550 milhões de barris de petróleo. Contabilizado o potencial energético do álcool, do bagaço e da palha da cana-de-açúcar, tem-se o equivalente à produção de 1,75 milhões de barris de petróleo/dia.

Desse modo, o bagaço de cana-de-açúcar, apresenta um enorme potencial para aplicações energéticas.

2.3 Resíduos florestais

Define-se como resíduos da colheita florestal, todo material produzido na parte aérea da árvore e que permanece no campo após a exploração da madeira a ser destinada para fins industriais. Geralmente, são representados pelas folhas, galhos, casca e ponteiros, estes últimos correspondendo ao caule com diâmetro inferior ao limite exigido para emprego da madeira como matéria prima industrial.

Estima-se a quantidade de resíduos pode variar entre 2 a 8% do volume de madeira comercial colhida, que é deixado na floresta como resíduos da colheita de madeira (FOELKEL, 2007).

O Brasil possui uma das mais altas taxas de produtividade em relação aos plantios florestais, os quais apresentam, em média, de 40 a 50 m^3 de madeira/ha/ano, ou seja, resultados excepcionais em termos mundiais. Os plantios de florestas comerciais no Brasil representam 4,8 milhões de hectares, dos quais, o principal produto visado é a madeira contida no caule das árvores. No entanto, por se tratar de biomassa para uso energético, o aproveitamento dos resíduos da colheita dessa madeira tem sido considerado também uma das fortes opções.

A biomassa florestal, além de ser um recurso renovável, ocupa grande extensão do território brasileiro e possui um riquíssimo potencial energético. Essas características provocam impacto positivo sobre outros recursos energéticos de custos mais elevados (ASSIS et al., 2008).

Considerando as possibilidades da aplicação do bagaço de cana-de-açúcar e dos resíduos da colheita florestal de madeira em suas formas naturais, cresce o interesse por tecnologias que possam agregar mais valor às suas características, no que se refere às suas aplicações energéticas. É nesse contexto, que surge o processo de torrefação, como uma alternativa para valorização do material lignocelulósico.

2.4 Tratamento térmico da biomassa – Torrefação

A torrefação corresponde a um processo de tratamento térmico da biomassa, que permite a obtenção de um material intermediário entre o material "in natura" e o carvão vegetal, com altos rendimentos gravimétricos, num processo que possui baixa demanda energética (Felfli, 2003). O combustível produzido apresenta melhores características energéticas. Essas características variam principalmente em função da temperatura final do processo, mas também sofrem interferência do tempo sob tal temperatura, da velocidade de aquecimento e das propriedades iniciais do material.

Torrefação compreende temperaturas entre 200-300°C, que permite a obtenção de um material intermediário entre madeira e carvão, esse material termicamente tratado apresenta algumas vantagens quando comparado com o material original, como diminuição da higroscopicidade, maior estabilização dimensional, maior resistência à degradação biológica, entre outros. (BRITO, 1993; GOHAR; GUYONET, 1998; KAILA, 1999; PINCELLI et al., 2002; KAMDEM et al.; 2002; DUCHEZ; GUYONNET, 2002; ALMEIDA et al., 2009).

A torrefação é recomendada como um tipo de pré-tratamento da biomassa antes da mesma ser submetida à alguns processos, como a gaseificação pois diminuiria as propriedades mecânicas e a resiliência. Além disso, a biomassa torrada necessita de menor energia para moagem devido à destruição parcial da sua estrutura fibrosa (BERGMAN et al., 2005).

No Brasil as primeiras referências sobre o emprego de tratamento térmico de madeiras, na concepção de processo de torrefação, foram apresentadas por Brito (1993). No entanto, a maioria dos trabalhos realizados na área é de países europeus, sendo a França pioneira nesse campo de pesquisa e uso dessa tecnologia.

Além da possibilidade da melhoria nas propriedades energéticas, espera-se ainda, que o produto da torrefação da biomassa seja mais facilmente fragmentável, devido à redução da sua resistência físico-mecânica, o que é desejável na hipótese da transformação do material para a forma pulverizada visando sua utilização energética em baixas granulometrias.

No uso energético a diminuição da higroscopicidade garante melhores desempenhos em geração de energia térmica, pois não há gasto energético para evaporação da água, além da inexpressiva absorção de umidade do ambiente que ela passa a ter, o que permite o armazenamento do combustível por períodos mais longos. A diminuição das propriedades mecânicas reflete-se no aumento da friabilidade, que é a capacidade da madeira em gerar finos (pó). Há uma diminuição da resistência mecânica que torna a biomassa torrada mais quebradiça e há a conseqüente formação de finos. A queima da biomassa em forma de finos é

mais eficiente, pois há um aumento da superfície específica do combustível o que provê melhores condições para transferência de calor; várias partículas têm maior superfície específica somadas que uma peça única (RODRIGUES, 2009).

Dentre as hipóteses de aplicação do material pulverizado, encontra-se a injeção de biomassa torrada nas ventaneiras dos alto-fornos siderúrgicos. Tal prática poderia ser estabelecida, na esteira do que já se realiza em relação à injeção de "moinha" nas ventaneiras dos alto-fornos, como substituto do óleo combustível. A "moinha" é um resíduo em pó obtido da fragmentação natural do carvão vegetal, resultante do seu manuseio, desde os locais de produção até sua aplicação nas indústrias siderúrgicas (MELO et al., 2005). É nesse quadro que se supõe ser possível o uso da madeira torrada, como material complementar à "moinha", para injeção nos alto-fornos.

Outra possibilidade de aplicação da madeira torrada na forma pulverizada encontra-se nas caldeiras geradoras de vapor d´água e que utilizam óleo combustível derivado do petróleo. A ideia é de se poder utilizar a biomassa torrada na forma de pó em substituição ao óleo combustível sem a necessidade de grandes adaptações na infra-estrutura das caldeiras. Com a injeção do combustível pulverizado poderiam ser reduzidas ou mesmo eliminadas as adaptações que implicam no aumento do volume da câmara de combustão e a colocação de grelha na fornalha, o que geralmente ocorre quando se opta pelo uso de biomassa "in natura" (BRITO; BARRICHELO, 1982).

É diante do quadro que se pretende realizar o presente estudo laboratorial, como instrumento básico de caracterização dos produtos sólidos obtidos da aplicação da torrefação nos resíduos da colheita florestal de madeira e bagaço de cana-de-açúcar. Nessa concepção, pretende-se identificar os efeitos de diferentes intensidades de tratamento térmico sobre algumas das propriedades daquelas biomassas, sobretudo na concepção de se poder oferecer informações iniciais sobre o potencial da obtenção de materiais torrados na forma pulverizada. É evidente que se os resultados mostrarem-se favoráveis, não estarão esgotadas as necessidades de atendimento de uma série de outras demandas que certamente se farão presentes, considerando o campo da produção e a aplicação energética dos produtos em escala industrial, o que poderá ser alvo de futuros novos estudos.

3 OBJETIVOS

O trabalho teve como objetivo geral estudar o efeito da torrefação nos resíduos florestais de *Eucalyptus grandis* e no bagaço de cana-de-açúcar através de análises de características e propriedades usualmente utilizadas para avaliação da biomassa como combustível.

Os objetivos específicos foram:

a) Determinar o rendimento de material sólido obtido das torrefações, considerando-se diferentes temperaturas e tempos de residência;
b) Avaliar a composição química dos materiais, em relação aos teores de extrativos e lignina;
c) Avaliar a composição imediata dos materiais, mediante a determinação dos teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas;
d) Determinar o poder calorífico superior dos materiais;
e) Realizar análise termogravimétrica das biomassas;
f) Analisar a friabilidade dos materiais após torrefação.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

No presente estudo foram utilizados 2 tipos de materiais: resíduos da colheita florestal de madeira de *Eucalyptus grandis* e bagaço de cana-de-açúcar.

4.1.1 Resíduos de eucalipto

Os resíduos da colheita florestal são constituídos por ponteiros, partes das árvores correspondentes ao fuste com casca com diâmetro inferior ao limite exigido pelas indústrias que utilizam a madeira como matéria-prima (entre 3 e 6 cm).

Estão sendo estudados resíduos gerados após a colheita florestal de madeira de *Eucalyptus grandis*, segunda rotação, com 7 anos de idade, pertencentes à empresa Duratex (Duraflora S.A.) localizada na região de Lençóis Paulista - SP. Após a retirada da madeira da área previamente definida para estudo e decorridos aproximadamente dois meses da data de início da derrubada das árvores do talhão, foi realizada a coleta manual dos resíduos encontrados nas áreas pós-colheita, primordialmente constituída por ponteiros, galhos e cascas. O tempo entre o corte das árvores e a coleta dos resíduos é padrão adotado pela empresa.

Os resíduos da colheita, essencialmente ponteiros das árvores e seus galhos finos, foram transportados do campo até a serraria Tabapinus - Serrarias Reunidas LTDA., Agudos – SP, para serem picados. O picador utilizado foi o picador a tambor Demuth - Modelo DPF 130/300 2 RT. Após tal operação, os resíduos foram embalados em “big bags” e conduzidos para o Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP, local no qual foram armazenados em barracão sob abrigo do sol e chuva em ambiente com livre circulação de ar. As figuras de 2 e 3 ilustram fases da obtenção dos resíduos de eucalipto. E a figura 4 ilustra essencialmente o material utilizado no presente estudo.

Figura 2 - Coleta de resíduos gerados da colheita de madeira de eucalipto e picador

Figura 3 - Resíduos de *Eucalyptus grandis* picados e armazenamento em “big bags”

Figura 4 - (A) Cavacos do resíduo de colheita florestal de *E. grandis*; (B) Indicação qualitativa do material com madeira e casca separados

4.1.2 Bagaço de cana-de-açúcar

O bagaço de cana-de-açúcar é proveniente da Usina Costa Pinto do Grupo Cosan, localizada em Piracicaba - SP. O material foi coletado em pilha de armazenamento do processo industrial da empresa. A origem do material, como espécie e idade não foi fornecida pela empresa em questão. De forma aleatória, foram coletados 5 sacos de 60 litros de bagaço, os quais foram transportados para laboratório. A figura 5 oferece ilustração sobre o bagaço.

Figura 5 – Bagaço de cana-de-açúcar sendo manuseado

4.2 Métodos

O estudo foi desenvolvido no contexto de atividades do projeto “Estudo multi-escala da biomassa torrada para usagem energética: da micro-partícula ao processo industrial”, apoiado pela FAPESP/INRA, envolvendo o Laboratórios Integrados de Química, Celulose e Energia (LQCE) da ESALQ-USP e o Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur le Matériau Bois (LERMAB). Desse modo, a maioria dos métodos seguiu as bases já definidas naquele projeto.

4.2.1 Torrefação da biomassa

Após os materiais terem sido transportados para o Laboratório de Química, Celulose e Energia do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP, foram selecionadas aleatoriamente amostras de cada saco de bagaço de cana-de-açúcar e de eucalipto, totalizando 5 amostras de cada material para determinação da umidade e o restante do material foi seco em estufa à 103 ± 2º C, até peso constante visando a redução de suas umidades para próximo de zero, antes de serem submetidos ao processo de torrefação (figuras 6 e 7).

Figura 6 - Resíduos de eucalipto submetidos à secagem em estufa

Figura 7 - Bagaço de cana-de-açúcar submetido à secagem em estufa

Para a determinação da umidade (base úmida) utilizou-se a eq. (1), a seguir:

$$U = \left(\frac{MU - MS}{MU}\right) \times 100 \qquad (1)$$

U = Umidade da biomassa (%)

MU = Massa do material úmido (g)

MS = Massa do material seco (g)

As torrefações foram conduzidas no LQCE/ESALQ/USP em estufa Fanem - Modelo 320 - Digital, dotada de sistema de aquecimento por resistência elétrica e circulação forçada de ar interno, com volume nominal de 450 litros. Para a realização dos tratamentos em atmosfera inerte o fluxo de nitrogênio injetado foi de 30 mL/min, de acordo com práticas já adotadas no laboratório para evitar a combustão do material de estudo.

Foram realizadas duas repetições de torrefações por tratamento, totalizando 16. Cada torrefação foi composta de 10 bandejas (25 x 10 x 10 cm) com cavacos de eucalipto e 10 com bagaço, com material previamente seco em estufa. Sendo assim, cada torrefação foi composta de 20 bandejas metálicas, sendo 10 de cada tipo de biomassa (figura 9).

Após as torrefações a estufa era desligada e as amostras permaneciam no seu interior em resfriamento natural até atingirem a temperatura média de 30°C. Uma avaliação da perda de massa foi realizada mediante a pesagem de amostras antes e após a aplicação dos tratamentos.

As condições de torrefação e os materiais determinaram 8 tratamentos, a saber:

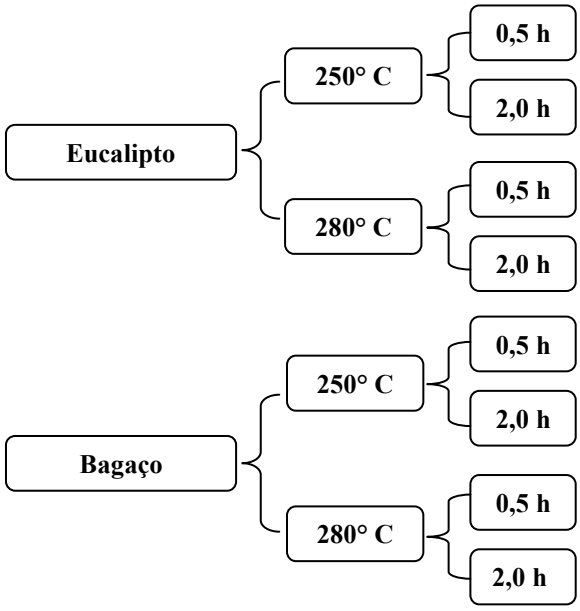

Figura 8 - Tratamentos utilizados no presente estudo

Figura 9 - Bandejas com resíduos introduzidos na câmara metálica

Com o objetivo de avaliar as alterações ocorridas no material, as amostras testemunha (material original) e as tratadas termicamente foram submetidas a vários ensaios, tais como: rendimento de materiais sólidos, teor de lignina, teor de extrativos, análise imediata, poder calorífico, termogravimetria e friabilidade.

4.2.2 Rendimento do tratamento térmico

Os rendimentos de material sólido das torrefações foram obtidos através do cálculo da relação entre a quantidade desse material após o tratamento e a quantidade de material introduzido previamente seco em estufa, conforme a eq. (2):

$$\mathrm{RT} = \left(\frac{\mathrm{MT}}{\mathrm{MB}}\right) \times 100 \qquad (2)$$

RT = Rendimento em material torrado (%)

MT = Massa de material torrado (g)

MB = Massa da biomassa original (g)

4.2.3 Análises e determinações

Após os materiais serem tratados termicamente, foram analisadas as seguintes características dos materiais produzidos:

Teor de lignina: segundo a norma Tappi T222;

Teor de extrativos: de acordo com a norma Tappi T204;

Análise Imediata: segundo a norma NBR 8112 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 1986);

Poder calorífico: determinação direta do poder calorífico a volume constante, em bomba calorimétrica IKA KV 600 digital, conforme a norma NBR 8633 (ABNT, 1984).

Foram escolhidas, aleatoriamente, 03 bandejas, das quais foram tomadas as amostras que também serviram para todas as demais análises dos produtos sólidos.

Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando encontradas diferenças significativas, os tratamentos foram comparados entre si por meio do teste de Tukey a 5% de probabilidade. A presença de letras diferentes ao lado dos resultados indica diferença significativa entre os tratamentos analisados, já as letras iguais indicam que não houve diferenças significativas.

4.2.4 Termogravimetria

Foram analisadas amostras de madeira sem casca de *Eucalyptus grandis* e bagaço de cana-de-açúcar, ambos "in natura". O material de eucalipto foi analisado sem casca pois esse é o padrão de análise do laboratório no qual o ensaio foi realizado.

Inicialmente o material foi seco em estufa a 103 ± 2ºC até peso constante e depois foi moído utilizando um moinho modelo IKA Werke M20 da marca Merse (figura 10). Após a moagem (figura 11), o material foi submetido ao teste termogravimétrico.

Figura 10 - Moinho IKA WERKE

Figura 11 - Etapas da moagem dos materiais

Figura 12 - Madeira de *E. grandis* antes (A) e depois (B) da moagem; Bagaço antes (C) e depois (D) da moagem

A termogravimetria foi realizada em equipamento Mettler TGA/DSC 1 (figura 13). Tal equipamento trata termicamente o material introduzido e, simultaneamente, coleta dados da perda de massa através de uma microbalança interna.

Para a realização dessa análise foram utilizados os 8 tratamentos já citados anteriormente, cada tratamento com aproximadamente 8 mg de amostra que foi inserida em cadinho de plástico de 70 µl. As etapas do ensaio foram:

- aquecimento com velocidade de elevação da temperatura de 5°C/min até a temperatura de 110°C, partindo da temperatura ambiente de 25°C;
- patamar a 110°C durante 0,5 h;
- aquecimento com velocidade de elevação da temperatura de 5°C/min até 250°C ou 280°C (em ambiente inerte);
- patamar de 0,5 ou 2,0 horas a 250°C ou 280°C, dependendo do tratamento;
- resfriamento com velocidade de 2°C/min.
- injeção de nitrogênio numa vazão de 50 ml/L

A figura 14 mostra um exemplo de curva de temperatura em função do tempo de ensaio realizado em um tratamento de 250°C de temperatura final e patamar final de 0,5 horas.

Figura 13 - Termobalança da Mettler (A), cadinho de plástico (B), reservatório de amostras (C)

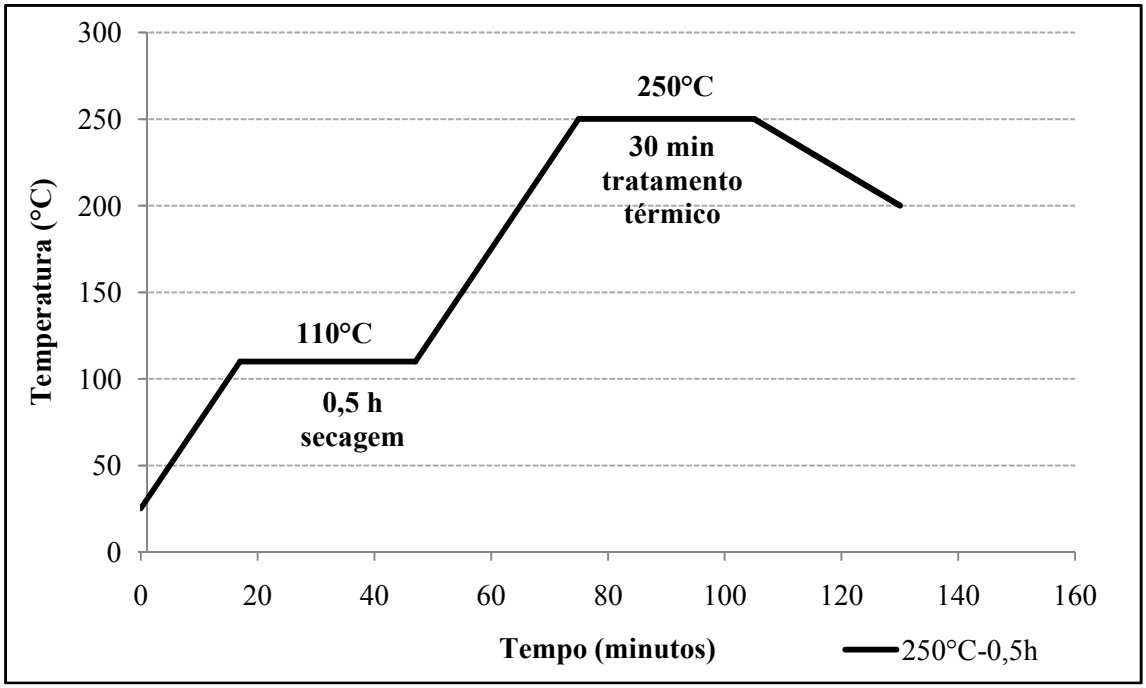

Figura 14 - Curva de temperatura utilizada no ensaio termogravimétrico do eucalipto a 250°C por 0,5 h

4.2.5 Friabilidade

Os materiais foram submetidos a um processo de moagem, com o objetivo de reduzir por ação mecânica o tamanho do material, com o auxílio de um moinho centrifugal Jokro-Muhle (figura 15), tendo como base metodológica a norma Merk-blatt V/105-VZIPC. A hipótese testada foi a de que, nas mesmas condições de moagem, o material torrado sofreria uma fragmentação mais intensa que o material original. Tal suposição foi avaliada através da determinação da granulometria dos materiais antes e após a moagem com o auxílio de agitador eletromagnético (figura 16). Todos os testes de moagem foram conduzidos num mesmo tempo de 5 minutos. O teste permitiu verificar se o material torrado apresentaria uma fração média menor que o material original após a moagem.

Figura 15 - Moinho centrifugal Jokro-Muhle utilizado para moagem dos resíduos

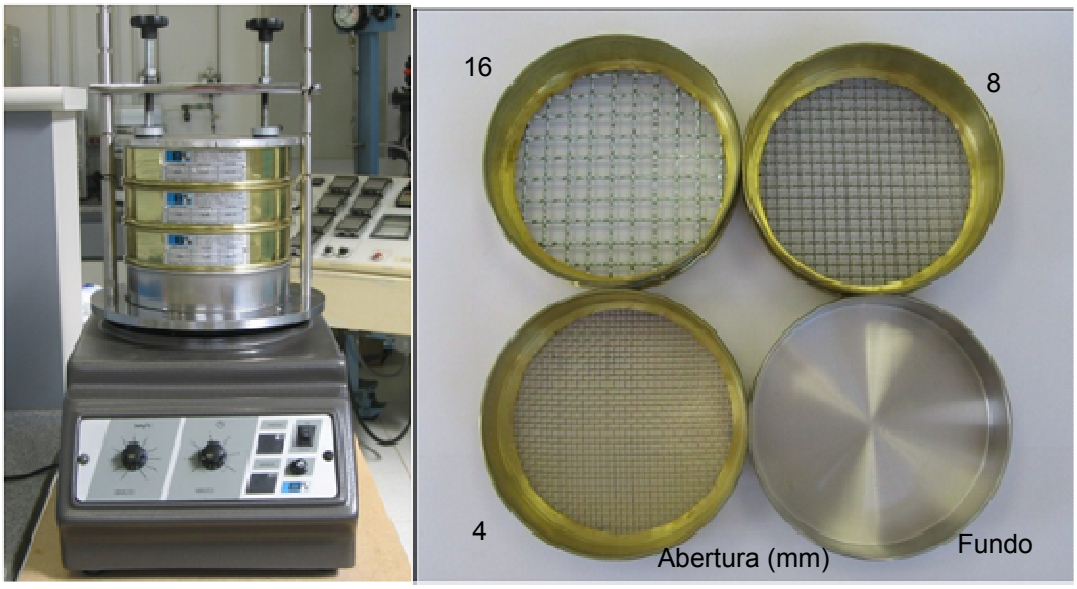

Figura 16 - Agitador eletromagnético de peneiras utilizado para análises granulométricas dos resíduos e as diferentes frações granulométricas

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Torrefação da biomassa

A figura 17 apresenta o resultado do teor inicial de umidade dos materiais coletados aleatoriamente nas embalagens originais das biomassas. Pode-se observar que o bagaço apresentou uma umidade superior a do eucalipto. Esse fato provavelmente é devido a madeira permanecer no campo por 2 meses após a colheita, o que diminui a sua umidade.

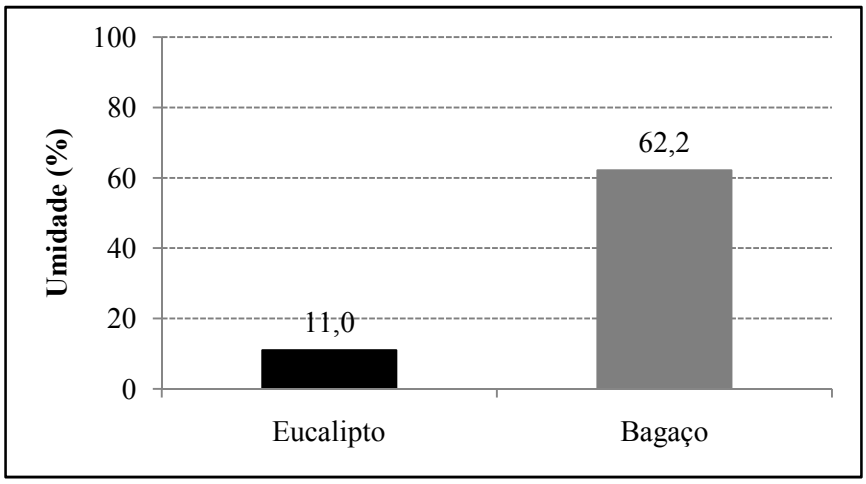

Figura 17 - Umidade média das amostras das biomassas

A tabela 1 e as figuras de 18 a 23 apresentam os resultados dos rendimentos de materiais sólidos das torrefações dos resíduos de eucalipto e do bagaço de cana-de-açúcar e trazem ilustrações referentes aos materiais.

Os resultados mostram que existe uma influência decisiva da temperatura de tratamento no rendimento de produtos sólidos obtidos após as torrefações. Observou-se que quanto maior a temperatura de tratamento, menor o rendimento obtido. Os tratamentos mostraram-se estatisticamente diferentes para o resultado médio de rendimento em materiais sólidos da torrefação (tabela 1).

O maior rendimento encontrado para ambas as biomassas foi o tratamento de 250°C por 0,5 h de tempo de residência, com valores de rendimento para o resíduo de eucalipto de 83,8 e de 87,9% para o bagaço. Já o tratamento que apresentou menor rendimento foi de 280°C com tempo de residência de 2 horas. Os valores foram 55,7 e 70,5% para o eucalipto e para o bagaço, respectivamente. Além do efeito da temperatura, observou-se também o efeito

do tempo de residência na temperatura final de torrefação. Constatou-se queda do rendimento à medida que o tempo de residência no patamar aumenta.

Esses resultados de rendimento de material sólido da torrefação são similares aos encontrados por Arias et al. (2008), que estudou o efeito da torrefação com temperaturas de 240, 260 e 280°C e tempos de residência de até 3 horas para o eucalipto.

A perda de massa do material devido à torrefação ocorre de acordo com o tipo de biomassa, temperatura e tempo de residência. Essa perda de massa é um indicador efetivo da severidade do tratamento térmico. Ela é causada pela degradação dos componentes químicos da madeira, especialmente hemiceluloses, que são mais sensíveis a degradação térmica, e componentes voláteis. A baixa estabilidade térmica das hemiceluloses, quando comparadas a celulose, geralmente é explicada pela falta de cristalinidade da mesma (YILDIZ et al., 2006).

Em relação aos tipos de materiais, constatou-se que os resíduos de eucalipto são mais susceptíveis ao efeito da temperatura e tempo de permanência sob tratamento do que o bagaço de cana-de-açúcar. Tal efeito pode ser consequência dos resíduos de eucalipto ser composto de uma mistura de madeira e casca, caracterizando um material heterogêneo. A casca é constituída, em grande parte, por parênquima. Suas paredes celulares são muito finas e essa estrutura anatômica frágil faz com que a casca seja muito susceptível à degradação térmica quando comparada à madeira (QUILHÓ et al., 2000).

Tabela 1 - Resultados do teste de Tukey para os rendimentos em produtos sólidos das torrefações, com α=0,05 de significância

Tratamentos	**Rendimento Médio (%)**	
	Eucalipto	**Bagaço**
250°C - 0,5h	83,7 **a**	87,8 **a**
250°C - 2,0h	75,6 **b**	81,8 **b**
280°C - 0,5h	72,2 **c**	76,4 **c**
280°C - 2,0h	55,0 **d**	70,6 **d**

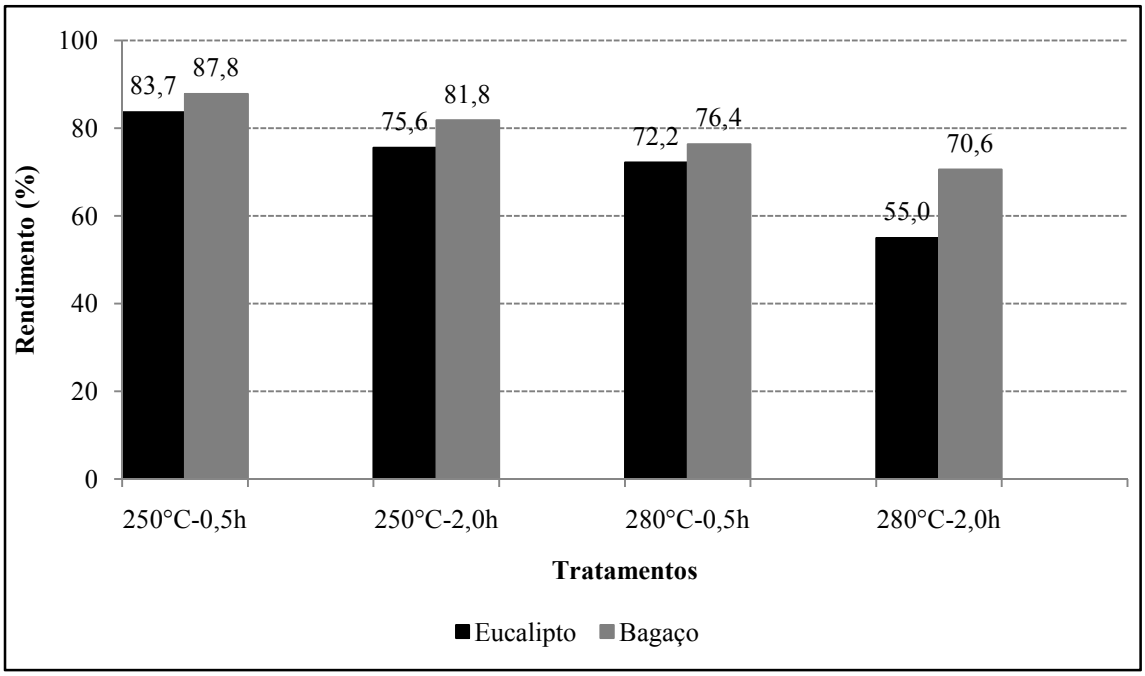

Figura 18 - Rendimento dos materiais sólidos resultantes da torrefação

Figura 19 - 250º C; 0,5 h; B: bagaço; E: eucalipto; 1: antes; 2: após

Figura 20 - 250º C; 2 h; B: bagaço; E: eucalipto; 1: antes; 2: após

Figura 21 - 280º C; 0,5 h; B: bagaço; E: eucalipto; 1: antes; 2: após

Figura 22 - 280º C; 2 h; B: bagaço; E: eucalipto; 1: antes; 2: após

Figura 23 - Amostras gerais dos materiais

5.2 Lignina e extrativos

Os resultados das análises químicas dos materiais sólidos são apresentados na tabela 2 e nas figuras de 24 a 27.

Tanto a biomassa de eucalipto, como a do bagaço, mostraram valores próximos para teores de lignina e de extrativos, com leve tendência de superioridade para o eucalipto.

Os resultados indicaram ainda que, para ambos os materiais, houve aumento no teor de lignina em função do aumento da temperatura. Da mesma forma, isso também se revelou na questão do aumento no tempo de permanência dos materiais no patamar da temperatura final de torrefação. Para as duas biomassas, o menor teor médio de lignina encontrado foi para o tratamento de 250°C por 0,5 horas, os valores foram de 39 e 36,5%, para o eucalipto e bagaço respectivamente. Já os maiores teores foram encontrados para o tratamento de 280°C por 2 horas, e foram para o eucalipto 72,2 e 74,9% para o bagaço.

Não se pode supor a ocorrência de síntese de lignina, mas sim que o resultado é função da degradação ocorrida nos carboidratos, sobretudo, as hemiceluloses, que são compostos mais susceptíveis à ação do calor. Proporcionalmente, a lignina, mais estável à degradação térmica, teria aumentada sua participação. Além disso, alguns produtos da degradação desses carboidratos poderiam estar presentes e contribuírem para se somarem à massa de lignina na forma de componente insolúvel na solução ácida usada na sua determinação, isso justificaria os altos teores encontrados para os tratamentos de 280°C por 2 horas no patamar final.

Tanto a biomassa de eucalipto como a do bagaço, apresentaram teores de extrativos similares nos seus materiais originais. Para ambas as biomassas, os menores teores de extrativos foram encontrados no tratamento térmico mais drástico, 280°C por 2 horas. O menor valor médio encontrado para o eucalipto foi de 6% e 4,2% para o bagaço. Já os maiores valores foram encontrados para ambas as biomassas no tratamento de 250°C por 0,5 horas, e foi de 8,8% para o eucalipto e 7,6% para o bagaço.

Para ambas as espécies, o aquecimento fez com que ocorresse uma elevação nesse teor, sobretudo, considerando-se a menor temperatura de tratamento. Provavelmente, sob tal nível de temperatura, pode ter ocorrido a liberação de componentes com solubilidades compatíveis com os solventes usados em suas determinações. Nas temperaturas mais elevadas e maiores patamares de residência na temperatura final de tratamento, a ação do calor seria mais efetiva, tornando-os mais voláteis e, conseqüentemente, fazendo com que os mesmos fossem eliminados nos gases da torrefação. Isso poderia explicar a redução dos seus teores na

maior temperatura de tratamento e nos patamares de 2 h. Esta mesma situação poderia explicar a influência do tempo de permanência na temperatura final.

Tabela 2 - Resultados do teste de Tukey para os teores de extrativos totais e lignina dos diferentes tratamentos e biomassas, com α=0,05 de significância

Tratamentos	**Lignina (%)**		**Extrativos Totais (%)**	
	Eucalipto	**Bagaço**	**Eucalipto**	**Bagaço**
Original	26,5 **a**	24,5 **a**	6,9 **a**	5,7 **a**
250°C - 0,5h	39,0 **b**	36,5 **b**	8,8 **b**	7,6 **b**
250°C - 2,0h	46,6 **c**	44,2 **c**	6,8 **a**	5,5 **a**
280°C - 0,5h	46,0 **c**	48,8 **d**	8,1 **c**	6,2 **a**
280°C - 2,0h	72,2 **d**	74,9 **e**	6,0 **d**	4,2 **c**

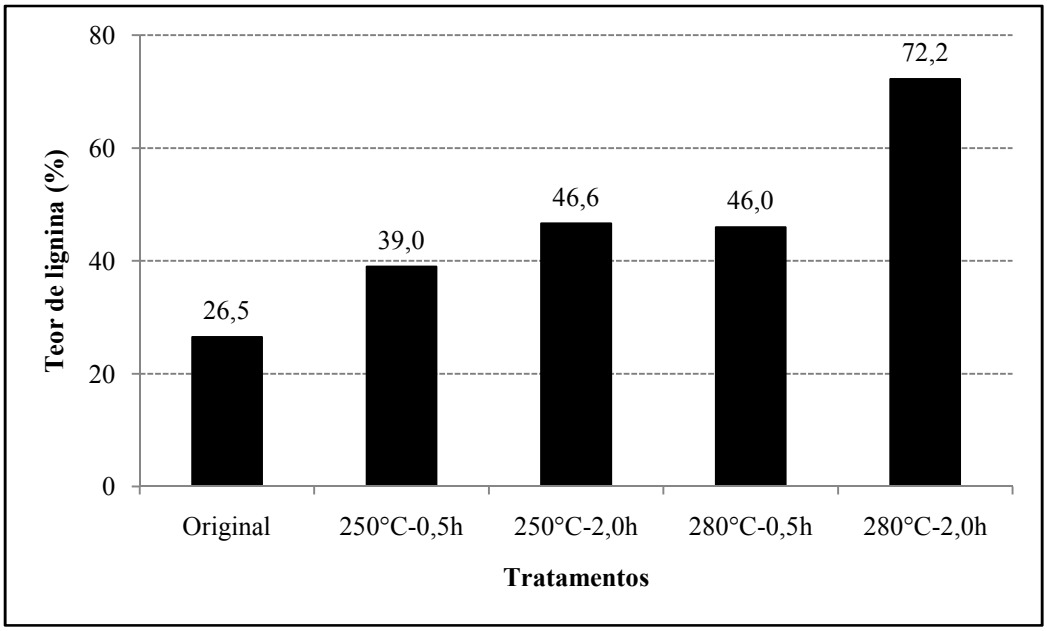

Figura 24 - Teor de lignina dos materiais sólidos de eucalipto

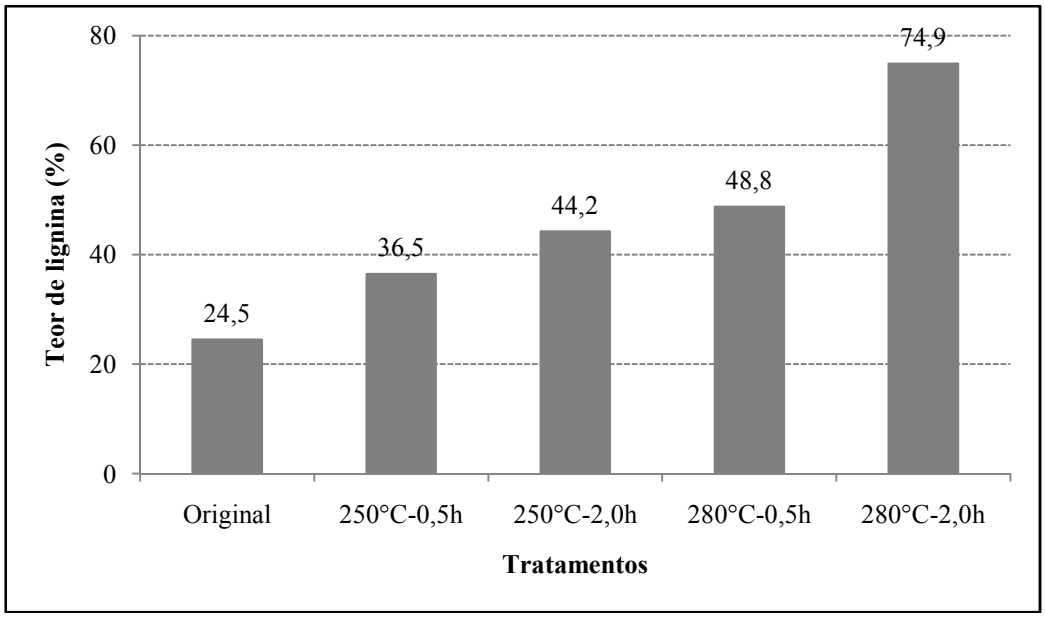

Figura 25 - Teor de lignina dos materiais sólidos de bagaço

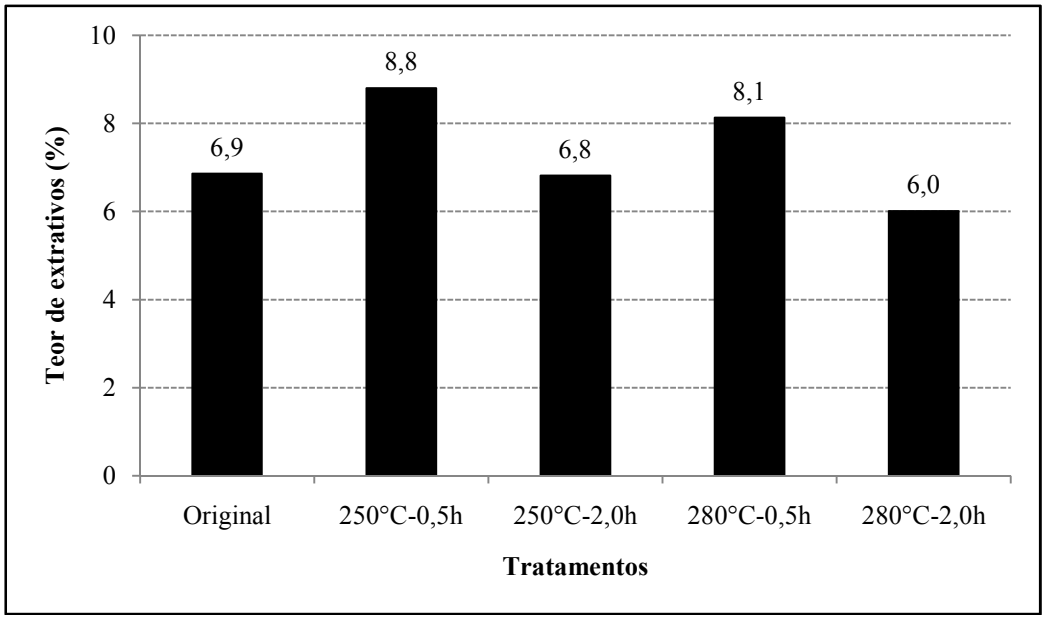

Figura 26 - Teor de extrativos dos materiais sólidos de eucalipto

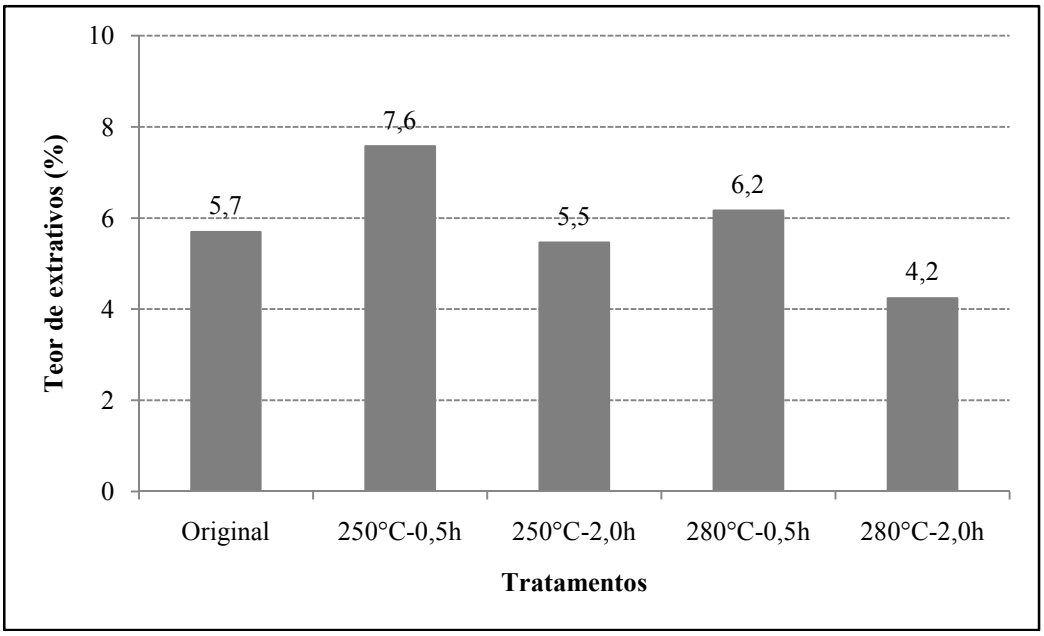

Figura 27 - Teor de extrativos dos materiais sólidos de bagaço

5.3 Análise imediata

Os resultados da análise imediata dos materiais sólidos dos resíduos de eucalipto e do bagaço de cana-de-açúcar são apresentados na tabela 3 e figuras 28 a 30.

Como esperado, para todas as biomassas e tratamentos foi observado um aumento no teor de carbono fixo, e consequente diminuição no teor de materiais voláteis, de acordo com o aumento da temperatura e tempo no patamar final. Tal alteração possivelmente deve-se ao fato de que com o aumento da temperatura e do tempo de residência, os constituintes da madeira sofreram degradação e perda de massa, concentrando o carbono, aumentando assim, o teor de carbono fixo. Esses resultados estão de acordo com os encontrados por Almeida et al. (2010) que estudou as alterações nas propriedades energéticas de três espécies de eucaliptos submetidos à torrefação em diferentes temperaturas.

As duas biomassas apresentaram menores teores de carbono fixo para o tratamento de 250°C por 0,5 horas. A menor média para o eucalipto foi de 24,1%, e de 19,4% para o bagaço. Já os maiores teores de carbono fixo, para as duas biomassas, foram obtidos no tratamento de 280°C por 2 horas. Para o eucalipto a maior média foi de 44,9% e de 29,5% para o bagaço.

Almeida et al. (2010) em estudo de torrefação de *Eucalyptus grandis* com temperaturas de 250 e 280°C e patamar final de 1 hora cita valores de 28,3 e 32,3% de carbono fixo, valores semelhantes ao encontrados no presente estudo.

Os teores de materiais voláteis sofreram redução com o aumento da temperatura e tempo de torrefação para ambas as biomassas, o maior valor encontrado para as biomassas foi para o tratamento mais brando, o de 250°C por 0,5 horas, os valores foram de 75,1% para o eucalipto e de 73,6% para o bagaço. Já o menor valor médio observado foi para o tratamento a 280°C por 2 horas, sendo de 54,0% para o eucalipto e de 58,8% para o bagaço.

Esses resultados de materiais voláteis mostram-se semelhantes aos encontrados por Almeida et al. (2010), que estudou temperaturas semelhantes de tratamento térmico e encontrou valores de materiais voláteis médios de 71,4% para temperatura de 250°C por 1 hora de patamar final, e 67,5% para 280°C por 1 hora de patamar final.

Observou-se ainda uma tendência de aumento no teor de cinzas dos materiais, na medida em que ocorreu aumento da temperatura e tempo de residência da torrefação, tendência também encontrada por Almeida (2010). Evidentemente, não se pode imaginar que este aumento possa ser devido a uma eventual síntese de materiais, uma vez que as cinzas, em sua maior parte, são compostas por substâncias minerais resistentes à degradação térmica. Com isso, à medida do aumento da temperatura, ocorreu uma maior concentração proporcional desses materiais devido à degradação e volatilização dos compostos orgânicos dos materiais originais.

Deve-se destacar que o teor de cinzas, maior para o bagaço, pode explicar o maior rendimento de produtos sólidos observados para este material, comparativamente ao eucalipto.

O teor de cinzas de uma biomassa afeta tanto a manipulação e os custos de processamento da conversão global de energia da biomassa. A energia disponível do combustível é reduzida em proporção à magnitude do teor de cinzas (McKENDRY, 2002).

De acordo com Almeida et al. (2010) que estudou as alterações nas propriedades energéticas de três espécies de eucaliptos submetidos à torrefação, o teor de cinzas das três madeiras estudadas é muito baixo (<0,3% base seca), mas muito maior na casca (> 3,5% base seca) e não foi afetado pela torrefação. As altas quantidades de cinzas na casca já foram relatadas na literatura (BRITO; BARRICHELO, 1978; RAGLAND et al., 1991; SENELWA; SIMS, 1999).

Os resultados encontrados estão de acordo com Mendes et al. (1982), que realizou estudos com diferentes temperaturas e observou que a temperatura final de tratamento é o parâmetro que mais influencia os teores de carbono fixo e materiais voláteis.

Tabela 3 - Resultados do teste de Tukey para os teores de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo dos diferentes tratamentos e biomassas, com α=0,05 de significância

Tratamentos	**Cinzas(%)**		**Materiais Voláteis (%)**		**Carbono Fixo (%)**	
	Eucalipto	**Bagaço**	**Eucalipto**	**Bagaço**	**Eucalipto**	**Bagaço**
Original	0,5 **a**	5,8 **a**	81,8 **a**	81,8 **a**	17,6 **a**	12,4 **a**
250°C - 0,5h	0,8 **abc**	7,0 **a**	75,1 **ab**	73,6 **b**	24,1 **b**	19,4 **b**
250°C - 2,0h	0,7 **ab**	7,7 **a**	71,1 **b**	71,8 **b**	28,2 **b**	20,4 **b**
280°C - 0,5h	1,1 **bc**	9,4 **ab**	70,6 **b**	66,5 **c**	28,3 **b**	24,0 **c**
280°C - 2,0h	1,1 **c**	11,8 **b**	54,0 **c**	58,8 **d**	44,9 **c**	29,4 **d**

*Foram escolhidas, aleatoriamente, 03 bandejas, das quais foram tomadas as amostras que também serviram para todas as demais análises dos produtos sólidos.

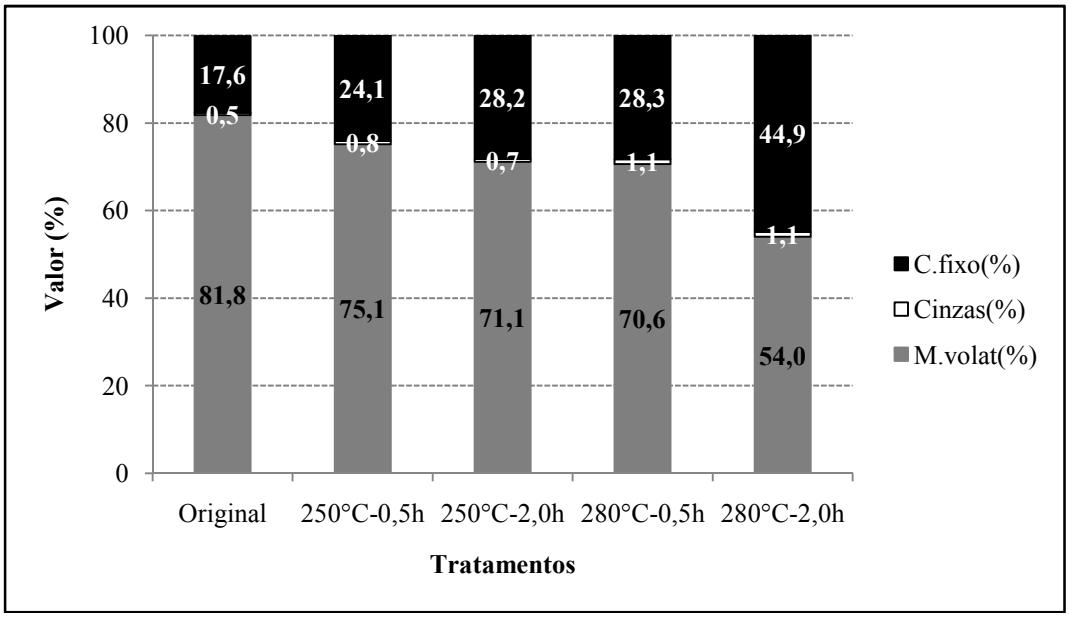

Figura 28 - Análise imediata dos materiais sólidos de eucalipto

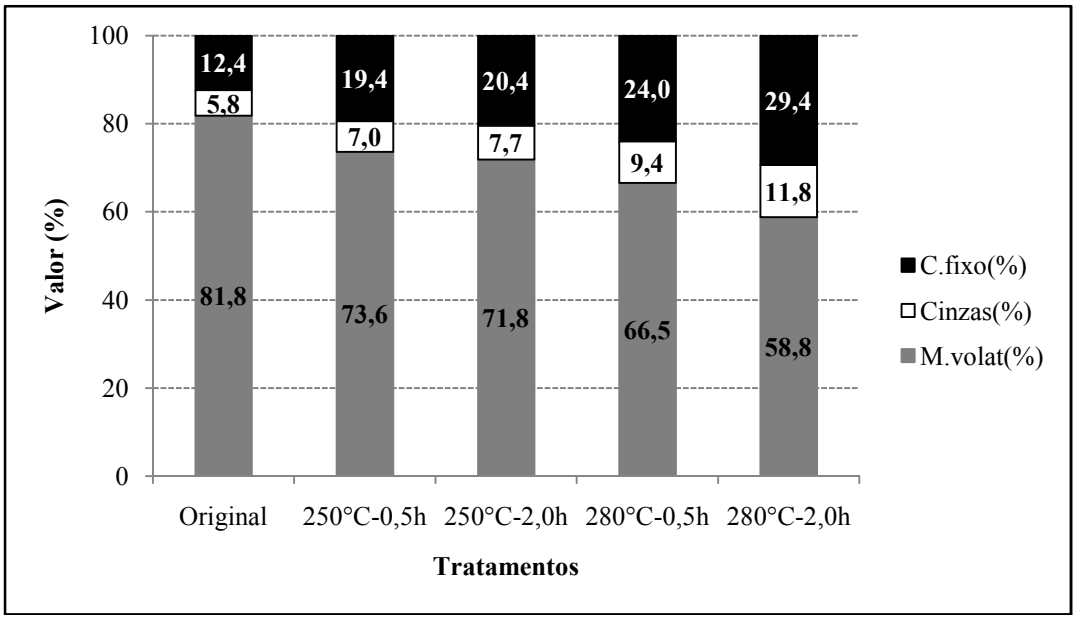

Figura 29 - Análise imediata dos materiais sólidos de bagaço

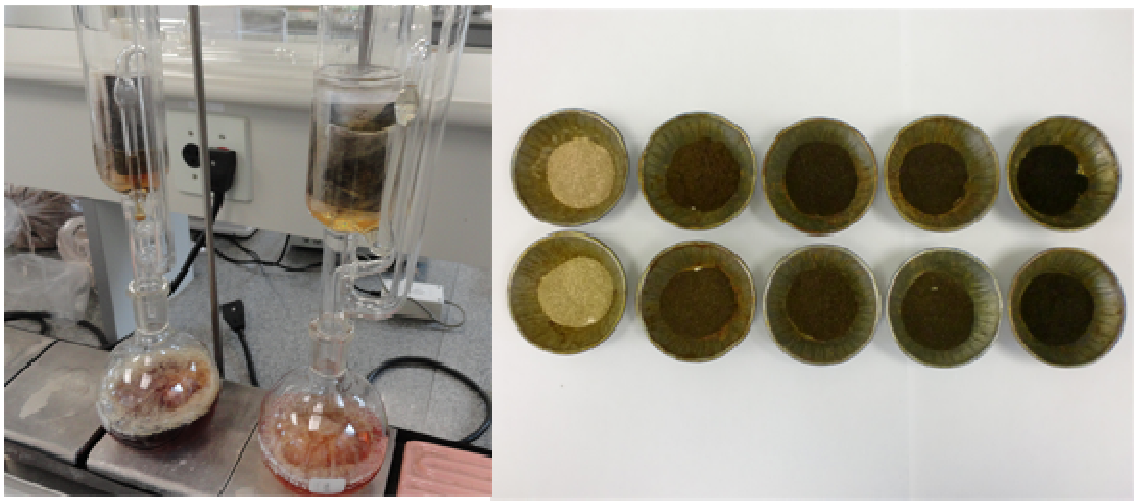

Figura 30 - Realização das análises químicas dos materiais

5.4 Poder calorífico superior

Os resultados referentes ao poder calorífico superior dos resíduos sólidos de eucalipto e de bagaço de cana-de-açúcar (testemunha e produtos sólidos torrados) são apresentados na tabela 4 e nas figuras 31 e 32.

De modo geral, houve tendência de aumento nos resultados conforme a elevação da temperatura e tempo de residência da torrefação em relação à testemunha. Os resultados estatísticos mostraram que existe diferença entre os tratamentos.

Observou-se a menor média de poder calorífico para o tratamento de 250°C por 0,5 horas para ambas as biomassas, os valores médios foram de 4961 kcal/kg para o eucalipto e de 4464 kcal/kg para o bagaço. Já a maior média de poder calorífico superior foi obtida para o tratamento de 280°C por 2 horas para ambos os materiais, os valores médios foram de 5832 kcal/kg para o eucalipto e 4899 kcal/kg para o bagaço. Tais resultados apresentam-se semelhantes aos encontrados por Almeida (2010) que cita valores médios de 5182 kcal/kg e 5493 kcal/kg para *Eucalyptus grandis* e temperaturas de 250 e 280°C e patamar final de 1 hora.

Pode-se perceber pela tabela 5 que o tratamento de 250°C por 0,5 horas apresentou um ganho energético menor quando comparado ao material original, esse valor para o eucalipto foi de 6,9% e de 0,4% para o bagaço. Já o maior ganho energético foi para o tratamento de 280°C por 2 horas e os valores encontrados foram de 25,7% para o eucalipto e de 10,2% para o bagaço. Pode-se dizer que a agregação energética do processo de torrefação para o eucalipto foi maior do que para o bagaço. Analisando os dados obtidos no presente estudo, essa diferença de ganho energético entre o eucalipto e o bagaço pode ser atribuída à maior presença de cinzas no bagaço, componente que não apresenta valor energético e que foi aumentando sua participação à medida do aumento da temperatura de tratamento e, consequentemente, da degradação térmica do bagaço-de-cana.

Segundo Jara (1989), o poder calorífico superior da madeira, além da umidade, é influenciado pela constituição química da madeira, principalmente a lignina e extrativos (resinas, óleos-resinas, matérias graxas, óleos, etc). Desta maneira, as coníferas que apresentam um conteúdo de resinas e lignina maior que as folhosas apresentam consequentemente um maior poder calorífico superior, que varia também conforme a parte da árvore que esteja em combustão.

Browning (1963), citado por Cunha et al. (1989) afirma que o poder calorífico é mais alto quanto maior o teor de lignina e extrativos, porque os mesmos contêm menos oxigênio que os polissacarídeos presentes na holocelulose (celulose e hemicelulose).

Tabela 4 - Resultados do teste de Tukey para o poder calorífico superior dos diferentes tratamentos e biomassas, com α=0,05 de significância

Tratamentos	**Poder calorífico(kcal/kg)**	
	Eucalipto	**Bagaço**
Original	4639 **a**	4444 **a**
250°C-0,5h	4961 **ab**	4464 **ab**
250°C-2,0h	5200 **b**	4535 **ab**
280°C-0,5h	5098 **b**	4705 **bc**
280°C-2,0h	5832 **c**	4899 **c**

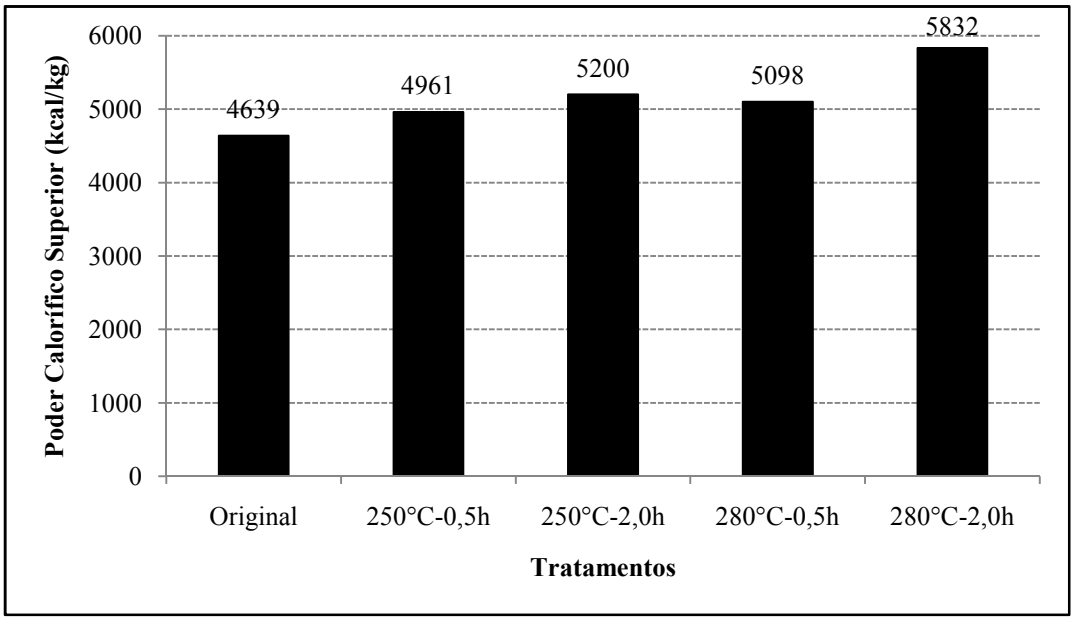

Figura 31 - Poder calorífico superior para os materiais sólidos de eucalipto

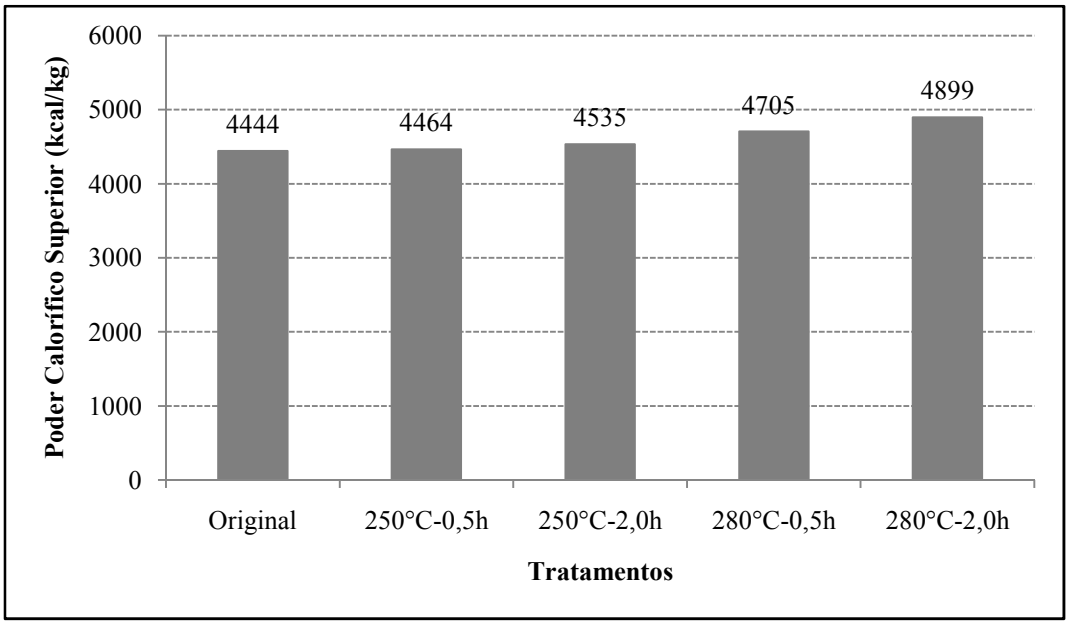

Figura 32 - Poder calorífico superior para os materiais sólidos de bagaço

Tabela 5 - Perda de massa e ganho energético para os diferentes tratamentos analisados em relação aos materiais originais

Biomassa	Temperatura de torrefação(°C)	Tempo de residência(h)	Perda de massa(%)	Ganho energético(%)
Resíduo florestal de *Eucalyptus grandis*	250	0,5	16,3	6,9
	250	2,0	24,4	12,1
	280	0,5	27,8	9,9
	280	2,0	45,0	25,7
Bagaço de cana-de-açúcar	250	0,5	12,2	0,4
	250	2,0	18,2	2,0
	280	0,5	23,6	5,9
	280	2,0	29,4	10,2

*A perda de massa refere-se ao cálculo 100 – Rendimento (%). Nesse caso foi calculada com base nos dados da termogravimetria, e o ganho energético foi calculado baseado nos valores do poder calorífico obtido dos materiais tratados em relação ao poder calorífico do material original

5.5 Termogravimetria

Essa análise foi realizada no Laboratoire d´Études et de Recherche sur le Matériau Bois – LERMAB, em Nancy, França.

As análises de termogravimetria fornecem importantes informações relacionadas ao comportamento energético da biomassa, ou seja, a temperatura e a massa que está sendo consumida durante a combustão, permitindo a elaboração de curvas que relacionem essas variáveis: temperatura, tempo e massa.

As perdas de massa dos tratamentos são apresentadas na tabela 6 e figura 33. As figuras de 34 e 35 mostram o comportamento das massas do eucalipto e do bagaço a 280°C no patamar final de 2 horas. É possível perceber duas perdas de massa distintas nos gráficos: no início da secagem, aproximadamente de 0 a 10 minutos, após existe uma estabilização da massa até aproximadamente 70 minutos de ensaio, depois ocorre outra perda de massa devido ao tratamento térmico, tal comportamento foi observado em todos os tratamentos.

Na temperatura de 250°C, para os dois materiais e patamares finais ocorre perda de massa menor durante o tratamento térmico quando comparado a temperatura de 280°C, comportamento já esperado devido à menor degradação das biomassas quando submetidas a uma menor temperatura de tratamento.

O comportamento das duas biomassas apresenta-se muito semelhante perante a ação do calor.

Pode-se observar, pela tabela 6, que a degradação do eucalipto e do bagaço apresenta-se de forma semelhante dentro dos tratamentos. Tanto para o eucalipto quanto para o bagaço, o tratamento que apresentou a menor perda de massa foi o de 250°C - 0,5 hora, com degradação de 20,2% e 17,1% respectivamente. Já o tratamento que apresentou maior perda de massa, para ambos os materiais, foi o de 280°C – 2,0 horas, com 55,4% para o eucalipto e 50,3% para o bagaço.

Tabela 6 - Perda de massa do eucalipto e bagaço nos diferentes tratamentos térmicos

Biomassa	**Temperatura de torrefação(°C)**	**Tempo de residência(h)**	**Perda de massa(%)**
Resíduo florestal de *Eucalyptus grandis*	250	0,5	20,2
	250	2,0	28,6
	280	0,5	37,2
	280	2,0	55,4
Bagaço de cana-de-açúcar	250	0,5	17,1
	250	2,0	26,1
	280	0,5	36,6
	280	2,0	50,3

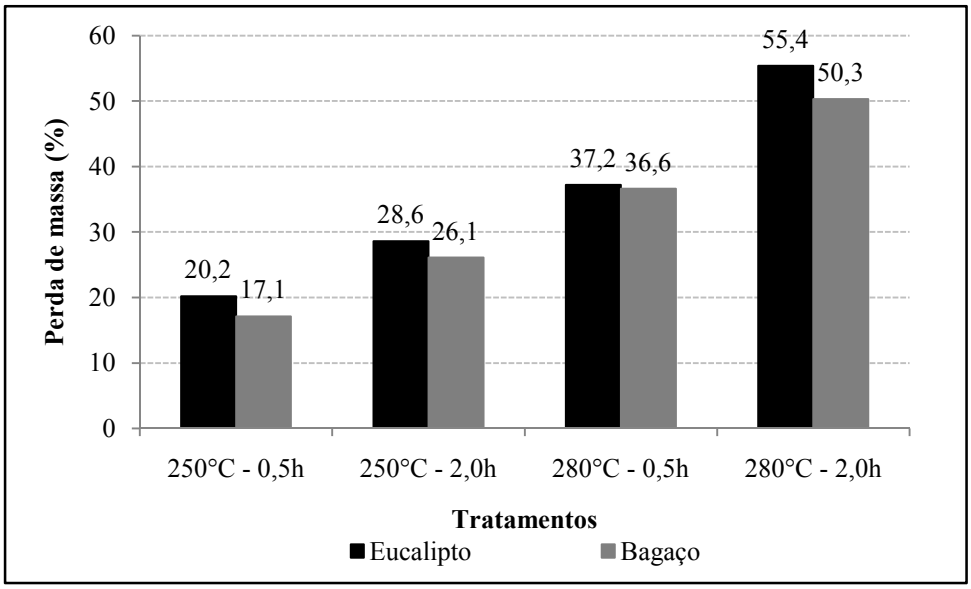

Figura 33 - Perda de massa para o eucalipto e o bagaço nos diferentes tratamentos térmicos

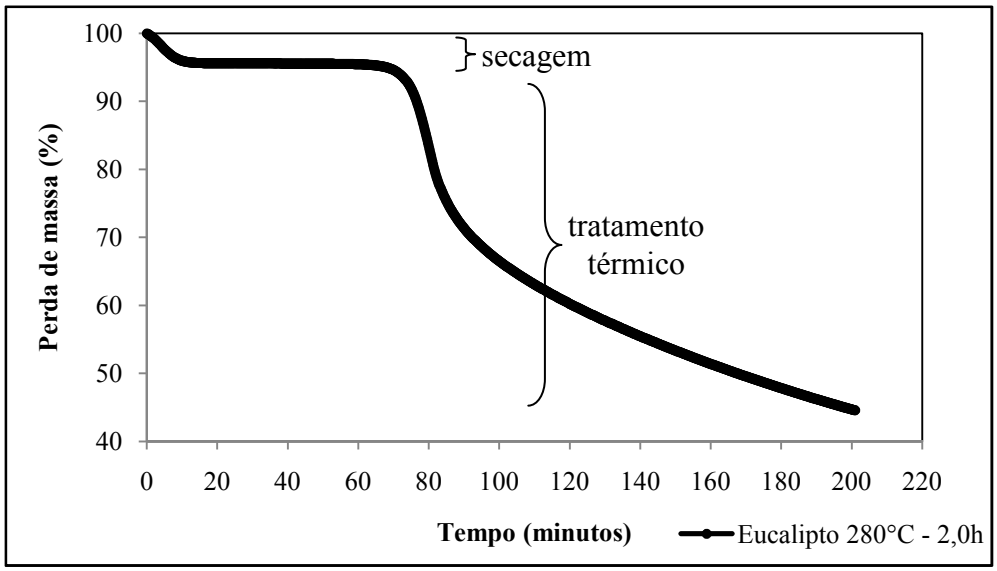

Figura 34 - Perda de massa para o eucalipto na temperatura de 280°C por 2,0 horas

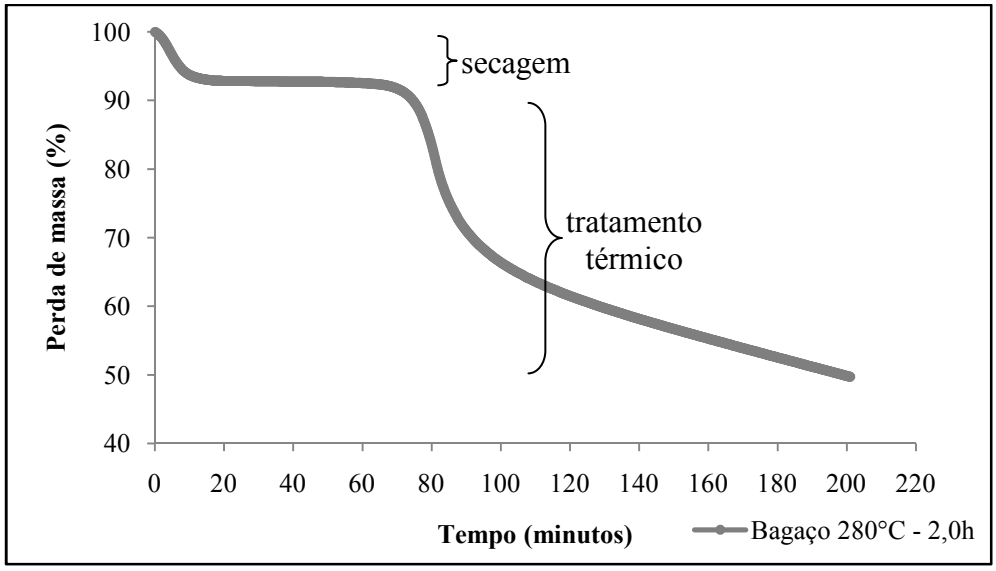

Figura 35 - Perda de massa para o bagaço na temperatura de 280°C por 2,0 horas

5.5 Friabilidade

As tabelas de 7 a 10 e as figuras de 36 a 39 apresentam os resultados das análises granulométricas e tamanho médio das biomassas, antes e após a moagem, nos quais se constatou a influência da temperatura de tratamento térmico na friabilidade do material. Já as figuras de 40 a 48 trazem ilustrações dos materiais estudados.

Para o eucalipto os resultados encontrados para análise granulométrica dos resíduos, antes da moagem, mostraram que 69,4% dos materiais testemunha ficaram retidos na primeira peneira de malha 16 mm, enquanto mesmo antes da moagem, para os materiais tratados a 280°C apenas 12,8% ficaram retidos na peneira de malha 16 mm. Este expressivo volume retido na primeira peneira foi causado, principalmente, pela presença da casca que devido ao seu emaranhado impediu que cavacos de menores tamanhos passassem para as peneiras subseqüentes. No caso do material tratado, a degradação geral do material, principalmente da casca, na temperatura de 280°C favoreceu o peneiramento do mesmo.

A diminuição da granulometria dos resíduos devido à torrefação induziu a redução do tamanho médio das partículas, mesmo antes da moagem. Comparando-se a testemunha e o material termicamente tratado, antes da moagem, a redução do tamanho médio foi de 17,8%.

Em relação à análise granulométrica dos resíduos após a moagem, observou-se que a maior parte do material original ficou retida na peneira de malha 0,42 mm (96,1%), enquanto

que para o material termicamente tratado, a retenção foi de apenas 41,3%, o que indica um aumento da friabilidade do material após o tratamento térmico.

Tabela 7 - Análise granulométrica e tamanho médio dos resíduos de eucalipto antes da moagem

Tratamento	Abertura da malha da peneira (mm)				TM[1]
	16,0	8,0	4,0	Fundo	(mm)
	---------- Material retido (%)[2] ----------				
Testemunha	69,4	12,1	12,7	5,8	10,7
	(12,3 - 17,7)	(4,6 - 37,9)	(5,2 - 40,6)	(2,6 - 44,5)	(0,6 - 5,3)
280° C	12,8	46,0	23,6	17,5	8,8
	(2,3 - 18,1)	(6,1 - 13,3)	(4,5 - 19,1)	(3,9 - 22,3)	(0,7 - 7,5)

[1]TM = tamanho médio da partícula; [2]Valores médios de 3 repetições seguidos de desvio padrão e coeficiente de variação (%) entre parêntesis

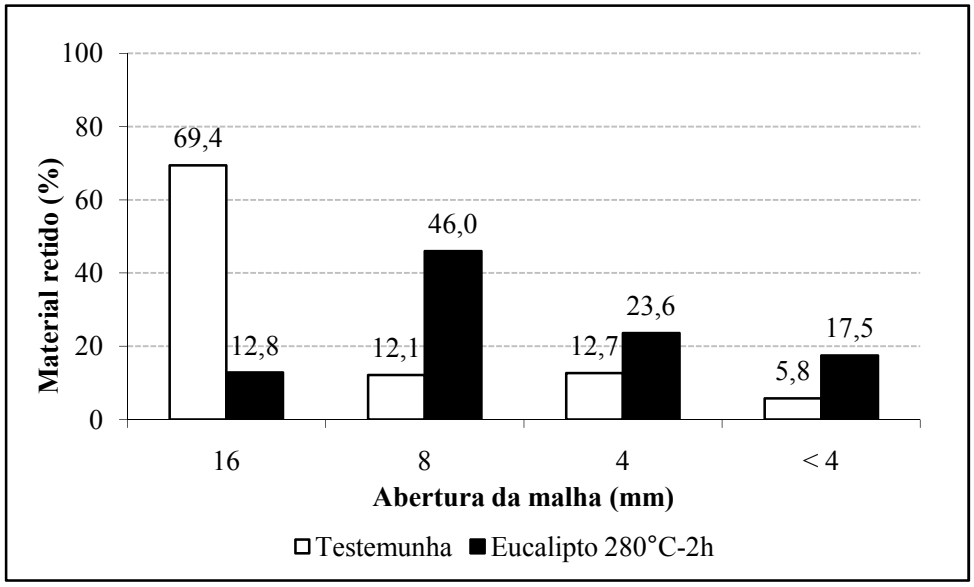

Figura 36 – Distribuição granulométrica do eucalipto antes da moagem: testemunha e tratamento 280°C-2h

Tabela 8 - Análise granulométrica dos resíduos de eucalipto após a moagem

Tratamento	Tamanho da partícula	
	> 0,42 mm	< 0,42 mm
	---------- (%)[1] ----------	
Testemunha	96,1	3,9
	(1,0 - 1,0)	(1,0 - 24,6)
280° C	41,3	58,7
	(20,8 - 50,4)	(20,8 - 35,5)

[1]Valores médios de 3 repetições seguidos de desvio padrão e coeficiente de variação (%) entre parêntesis

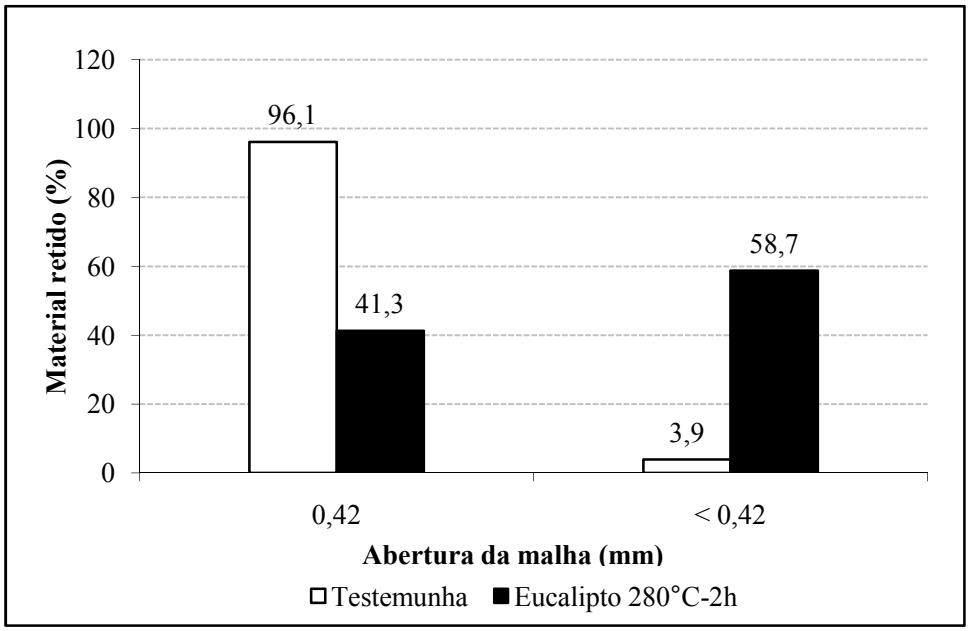

Figura 37 - Distribuição granulométrica do eucalipto após a moagem: testemunha e tratamento 280°C-2h

No caso do bagaço, antes da moagem 42,7% do material testemunha ficaram retidos na primeira peneira de malha 16 mm, e para os materiais tratados a 280°C, não houve material retido na peneira de malha 16 mm.

A diminuição da granulometria dos resíduos devido à torrefação induziu, também nesse caso, a redução do tamanho médio das partículas mesmo antes da moagem. Comparando-se a testemunha e o material termicamente tratado, antes da moagem, a redução do tamanho médio foi de 60,6%. Essa expressiva diferença mostra que o bagaço possui uma granulometria menor que a do eucalipto e sofre grande degradação térmica.

Em relação à análise granulométrica dos resíduos após a moagem, observou-se que a maior parte do material original ficou retida na peneira de malha 0,42 mm (77,7%), enquanto que para o material termicamente tratado a retenção foi de apenas 0,2%, o que indica alta friabilidade do material após o tratamento térmico. Tanto no caso do eucalipto quanto do bagaço, esse fato provavelmente é devido ao tratamento térmico reduzir a resistência mecânica da material por fragilizar suas estruturas anatômicas, dessa forma, facilitando a moagem. Um estudo mais detalhado do efeito do tratamento térmico na estrutura anatômica dos materiais é importante para entender mais detalhadamente essa redução na resistência mecânica.

Tabela 9 - Análise granulométrica e tamanho médio do bagaço antes da moagem

Tratamento	Abertura da malha da peneira (mm)				TM[1]
	16,0	8,0	4,0	Fundo	(mm)
	---------- Material retido (%)[2] ----------				
Testemunha	42,7	1,6	5,1	50,6	6,6
	(9,9 – 23,3)	(1,1 – 70,4)	(1,5 – 29,3)	(7,8 – 15,4)	(0,9 – 13,0)
280° C	0,0	1,3	2,8	36,7	2,6
	(0,0 – 0,0)	(0,6 - 43,5)	(0,6 – 21,3)	(3,8 - 10,3)	(0,1 – 4,2)

[1]TM = tamanho médio da partícula; [2]Valores médios de 3 repetições seguidos de desvio padrão e coeficiente de variação (%) entre parêntesis

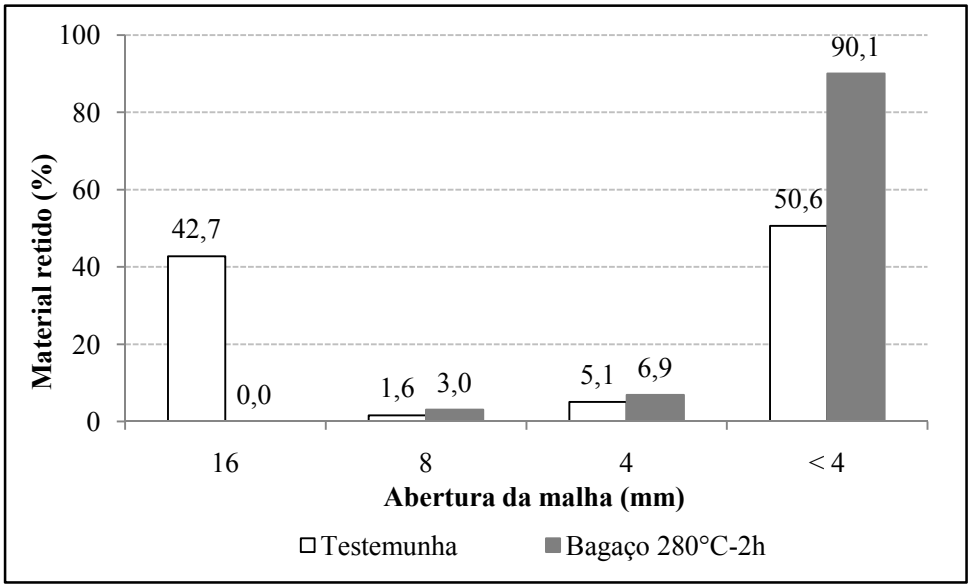

Figura 38 - Distribuição granulométrica do bagaço antes da moagem: testemunha e tratamento 280°C-2h

Tabela 10 - Análise granulométrica do bagaço após a moagem

Tratamento	Tamanho da partícula	
	> 0,42 mm	< 0,42 mm
	---------- (%)[1] ----------	
Testemunha	77,7	22,3
	(2,5 – 3,2)	(2,5 – 11,2)
280° C	0,2	99,8
	(0,4 – 173,2)	(0,4 – 0,4)

[1]Valores médios de 3 repetições seguidos de desvio padrão e coeficiente de variação (%) entre parêntesis

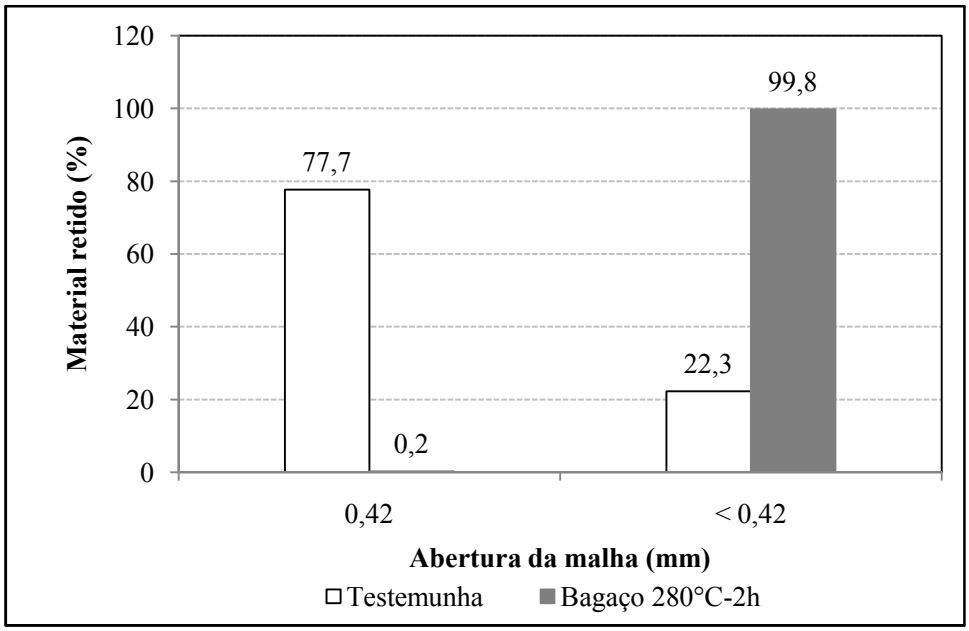

Figura 39 - Distribuição granulométrica do bagaço após a moagem: testemunha e tratamento 280°C-2h

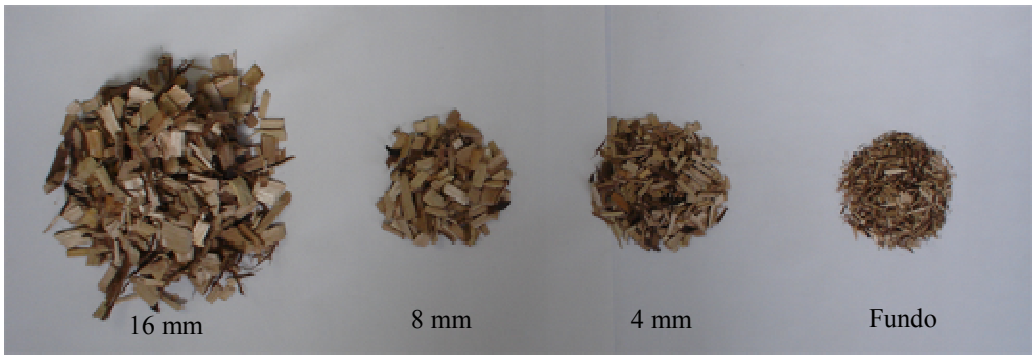

Figura 40 - Eucalipto original após a classificação granulométrica

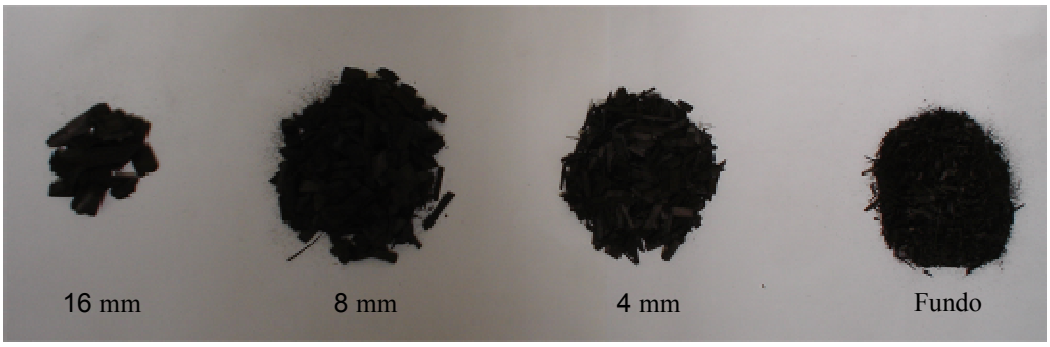

Figura 41 - Eucalipto 280°C – 2,0 h após classificação granulométrica

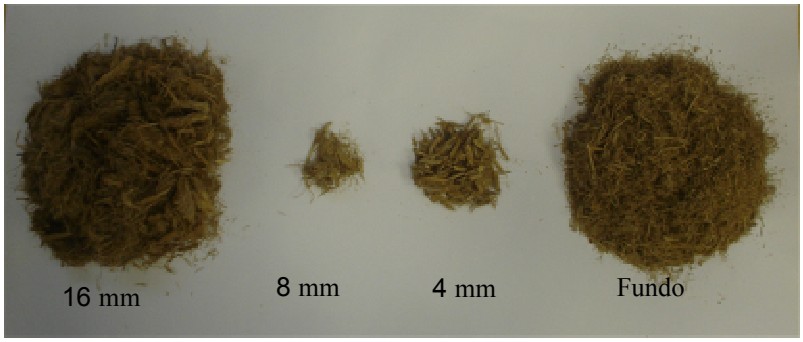

Figura 42 - Bagaço original após classificação granulométrica

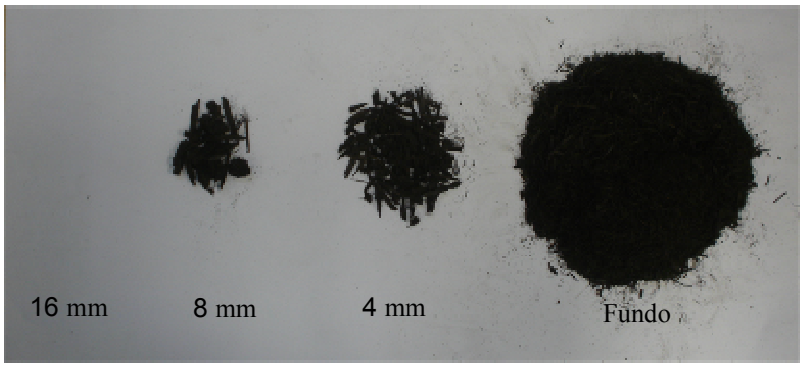

Figura 43 - Bagaço 280°C – 2,0 h após classificação granulométrica

Figura 44 - Eucalipto original após moagem e classificação granulométrica

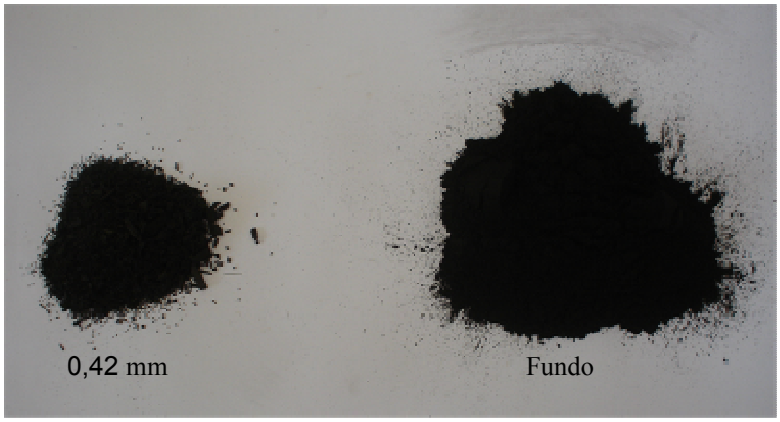

Figura 45 - Eucalipto 280°C – 2,0h após moagem e classificação granulométrica

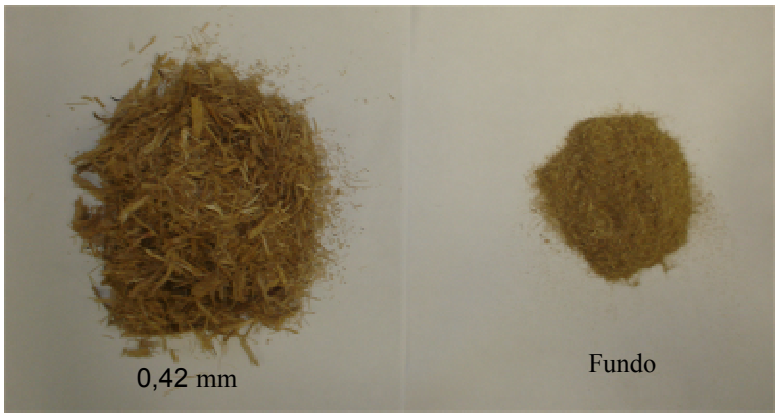

Figura 46 - Bagaço original após a moagem e classificação granulométrica

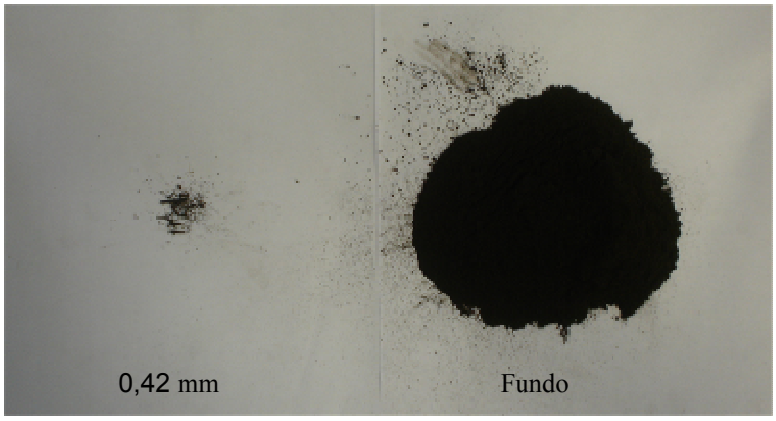

Figura 47 - Bagaço 280°C – 2,0h após moagem e classificação granulométrica

Figura 48 - Bagaço 280°C – 2,0h antes e após a moagem

6 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados no presente trabalho permitem concluir que:

- Houve influência da temperatura e do tempo de residência sobre o rendimento de material sólido obtido das biomassas submetidas às torrefações. De uma forma geral, quanto maiores as temperaturas e os tempos, menores os rendimentos;

- Tanto a biomassa de eucalipto como a do bagaço apresentaram valores próximos para teores de lignina e de extrativos, com leve tendência de superioridade para o eucalipto;

- Em relação ao teor de extrativos, os resultados obtidos indicaram que inicialmente a torrefação contribui para uma elevação nesse teor, porém, no tratamento mais drástico ocorreu uma diminuição nos valores;

- De modo geral, com o aumento da temperatura de tratamento e tempo no patamar final de torrefação, houve incremento no teor de carbono fixo, redução do teor de materiais voláteis e aumento no teor de cinzas para ambas as biomassas;

- Houve tendência de aumento nos valores de poder calorífico dos materiais, conforme a elevação da temperatura e tempo de torrefação. Observaram-se maiores valores para o eucalipto;

- Ambas as biomassas apresentaram comportamentos similares em relação a perda de massa na termogravimetria, corroborando, inclusive os resultados obtidos a torrefação, de que a perda é maior quanto maior forem a temperatura e o tempo de residência;

- Verificou-se uma contribuição decisiva do tratamento térmico na redução granulométrica e aumento da friabilidade de ambos os materiais.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 15 mar. 2009.

ALMEIDA, G.; BRITO, J.O.; PERRE, P. Changes in wood–water relationship due to heat treatment assessed using micro-samples of Eucalyptus. **Holzforschung**, Nancy, v. 63, n. 1, p. 80–88, 2009.

_____. Alterations in energy properties of eucalyptus wood and bark subjected to torrefaction: the potential of mass loss as a synthetic indicator. **Bioresource Technology,** Nancy, n. 101, p. 9778–9784, 2010.

ARIAS, B.; PEVIDA, C.; FERMOSO, J.; PLAZA, M.G.; RUBIERA, F.; PIS, J.J. Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass. **Fuel Processing Technology,** Oviedo, v. 89, p. 169–175, 2008.

ASSIS. C.O.; TRUGILHO, P.F.; MENDES, L.M.; SILVA, J.R.M.; LIMA, J.T. Sistema alternativo para carbonização de madeira. **Scientia Forestalis,** Piracicaba, v. 36, n. 78, p. 133-140, jun. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633/84:** carvão vegetal – determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

_____. **NBR 8112:** carvão vegetal – análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. 6 p.

BERGMAN, P.C.A.; BOERSMA, A.R.; KIEL, J.H.A.; PRINS, M.J.; PTASINSKI, K.J., JANSSEN, F.J.J.G. **Torrefaction for entrained-flow gasification of biomass.** Amsterdam, 2005. 50 p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanço Energético Nacional:** resultados preliminares ano base 2005. Brasília, 2006.

_____. **Balanço Energético Nacional 2008.** 2009. Disponível em: <http://www.mme.gov.br>. Acesso em: 15 mar. 2009.

BRITO, J.O. Estudo preliminar de retificação térmica da madeira de eucalipto. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., 1993, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBS; SBEF, 1993. p. 774.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: I. Densidade e teor de lignina da madeira de Eucalipto. **IPEF,** Piracicaba, n. 14, p. 9-20, jul. 1977.

_____. Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca. **IPEF**, Piracicaba, n. 16, p. 63–70, 1978.

_____. Aspectos técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis. In: SEMINÁRIO DE ABASTECIMENTO ENERGÉTICO INDUSTRIAL COM RECURSOS FLORESTAIS, 2., 1982, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 1982. p. 101-137.

CLEMENTINO, L.D. **A conservação de energia por meio da co-geração de energia elétrica.** São Paulo: Érica, 2001. 176 p.

CUNHA, M.P.S.C.; PONTES, C.L.F.; CRUZ, I. A.; CABRAL, M. T. F. D.; CUNHA NETO, Z.B.; BARBOSA, A.P.R. Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 3., 1989, São Carlos. **Anais...** São Carlos, 1989. v. 2, p. 93-121.

DOAT, J. Un nouveau produit énergétique pour les pays en développement. Le bois torréfié. **Revue Bois et Forets des Tropiques,** Paris, v. 208, p. 57-67, 1985.

DUCHEZ, L.; GUYONNET, R. **Principles and applications of wood rectification.** 2002. Disponível em: <http:techtp.com/twpapers/fao>. Acesso em: 25 ago.2009.

EID, F.; PINTO, S.S.; CHAN, K. Mudanças tecnológicas e co-geração de energia na industria sucroalcooleira. **Revista de Ciência e Tecnologia,** Recife, v.2, n.1, p. 48-57, 1998.

ERNESTO, V.A.R.T. **Caracterização térmica do bagaço da cana-de-açúcar visando aproveitamento energético.** 115 p. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Araraquara, 2009.

FELFLI, F. **Torrefação de biomassa:** viabilidade técnica e potencial de mercado. 2003. 143 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

FOELKEL, C. Gestão ecoeficiente dos resíduos florestais lenhosos da eucaliptocultura. 2007. 49 p. **Eucalyptus Online Book & Newsletter.**

GOHAR, P.: GUYONET, R. Development of wood rectification process at the industrial stage. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WOOD PRESERVATION, 4., 1998, Cannes. Cannes: IRG, 1998. p. 173–178.

GOMES, P.A.; OLIVEIRA, J.B. Teoria da carbonização da madeira. In: PENEDO, W.R. **Uso da madeira para fins energéticos.** Belo Horizonte: CETEC, 1980. p. 27-41.

JARA, E.R.P. **O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1989. 6 p.

KAILA, P. Arquitectura en Finlandia: tecnologia de la construcción. Los paneles. **Revista Internacional para la Industria Maderera para Latino América,** v. 19, p. 8–19, 1999.

KAMDEM, D.P.; PIZZI, A.; JERMANNAUD, A. Durability of heat-treated wood. **Holz Roh-Werkstoff,** Nancy, v. 60, p. 1–6, 2002.
KOLLMAN, F.; CÔTÉ Jr., W.A. **Principles of wood science and technology.** I – solid wood. New York: Springer Verlag, 1968. 592 p.

MACHADO, G.O. **Preparação e caracterização de CMC e CMC grafitizada.** 2000. 101 p. Dissertação (Mestrado em Química) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

MACHADO, R.C.; LIMA, M.H.R. Co-geração na produção de Alumina no Brasil. In: SEMINÁRIO DE METAIS NÃO-FERROSOS, 10., 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2002.

McKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresources Technology,** Amsterdam, v. 83, p. 37–46, 2002.

MELO, F.A.O.; SILVA, J.N.; SILVA, J.S.S.; DONZELES, S.M.L.; PAULA, A.L.T. Avaliação de uma fornalha para aquecimento direto de ar utilizando moinha de carvão. **Engenharia na Agricultura,** Viçosa, v. 13, n. 2, p. 124-129, abr./jun. 2005.

MENDES, M.G.; GOMES, P.A.; OLIVEIRA, J.B. Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal. In: PENEDO, W.R. **Produção e utilização de carvão vegetal.** Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 74-89.

MESA PÉREZ, J.N. **Testes em uma planta de pirólise rápida de biomassa em leito fluidizado: critérios para sua otimização**. 2004. 189 p. Tese (Doutorado em Construções Rurais e Ambiência) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas Campinas, 2004.

NAKAMURA, T.; KAWAMOTO, H.; SAKA, S. Pyrolysis behavior of Japonese ceder wood lignin studied with various model dimers. **Journal of Analytical and Applied Pyrolusis,** Amsterdam, v. 81, p. 173–182, 2008.

OLIVEIRA, R.M. **Utilização de técnicas de caracterização de superfícies em madeiras tratadas termicamente.** 2009. 127 p. Tese (Doutorado em Física Aplicada) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

PELLEGRINI, M.C. **Inserção de centrais co-geradoras a bagaço de cana no parque energético do estado de São Paulo:** exemplo de aplicação de metodologia para análise dos aspectos locacionais e de integração energética. 2002. 167 p. Dissertação (Mestrado em Energia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

PINCELLI, A.L.P.S.; BRITO, J.O.; CORRENTE, J.E. Avaliação da termorretificação sobre a colagem na madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea* var. Hondurensis. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 61, p. 122–132, 2002.

PINHEIRO, P.C.C.; SAMPAIO R.S.; DE REZENDE M.A.; BASTOS FILHO, J.G. Fundamentos e prática da carbonização da biomassa. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE USO DA BIOMASSA PLANTADA PARA PRODUÇÃO DE METAIS E GERAÇÃO DE ELETRICIDADE, 1., 2001, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2001.

QUILHÓ, T.; PEREIRA, H.; RICHTER, H.G.. Within–tree variation in phloem cell dimensions and proportions in eucalyptus globulus. **IAWA Journal,** Utrecht, v. 21, p. 31–40, 2000.

RAGLAND, K.W.; AERTS, D.J.; BAKER, A.J. Properties of wood for combustion analysis. **Bioresources Technology,** Amsterdam, v. 37, p. 161–168, 1991

RODRIGUES, T.O. **Efeitos da torrefação no condicionamento de biomassa para fins energéticos.** 2009. 71 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

ROUSSET, P.; LAPIERRE, C.; POLLET, B.; QUIRINO, W.; PERRE, P. Effect of severe thermal treatment on spruce and beech wood lignins. **Annals of Forest Science,** Les Ulis, v. 66, p. 110p1–110p8, 2009.

SANTOS, E.G. **Estudo da adsorção de contaminantes orgânicos provenientes da água de extração do petróleo, em coluna de leito fixo, utilizando biomassas como adsorventes.** 2005. 229 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.

SANTOS, M.L.; LIMA, O.J.; NASSAR, E.J.; CIUFFI, K.J.; CALEFI, P.S. Estudo das condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por análise térmica. **Química Nova**, São Paulo, v. 34, n. 3, p. 507-511, 2011.

SENELWA, K.; SIMS, R.E.H. Fuel characteristics of short rotation forest biomass. **Biomass Bioenergy**, Amsterdam, v. 17, p. 127–140, 1999.

TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY. **Test methods.** Atlanta: Tappi Press, 2007. 2 v.

YILDIZ, S.; GEZER, E.D.; YILDIZ, U.C. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. **Building and Environment,** Oxford, v. 41, p. 1762–1766, 2006.

ANEXOS

Anexo A - Resultados de Rendimento dos materiais nos diferentes tratamentos

Tratamento	Rendimento (%)	
	Bagaço	Eucalipto
250°C-0,5h	87,1	84,2
	88,5	83,2
Média	87,8	83,7
Desv. Pad.	1,0	0,7
C.V.	1,1%	0,9%
250°C-2,0h	82,7	74,3
	80,9	76,8
Média	81,8	75,6
Desv. Pad.	1,2	1,8
C.V.	1,5%	2,3%
280°C-0,5h	75,7	76,6
	77,0	67,8
Média	76,4	72,2
Desv. Pad.	1,0	6,2
C.V.	1,3%	8,6%
280°C-2,0h	71,5	54,4
	69,6	55,6
Média	70,6	55,0
Desv. Pad.	1,3	0,9
C.V.	1,9%	1,6%

Anexo B - Resultados das análises químicas dos materiais nos diferentes tratamentos

(continua)

Material	Tratamento	Rep.	M.volat(%)	Cinzas(%)	C.fixo(%)	PCS (kcal/kg)
EUCALIPTO	Original	1	81,0	0,5	18,0	4563,0
		2	81,8	0,5	17,7	4630,0
		3	82,6	0,4	17,0	4723,0
		Média	81,8	0,5	17,6	4638,7
		Desv.Pad.	0,8	0,0	0,5	80,4
		CV	1,0%	8,3%	3,1%	1,7%
	250°C - 0,5 h	1	74,6	0,7	24,6	4961,0
		2	75,4	0,7	23,8	4961,0
		3	75,2	0,8	24,0	4961,0
		Média	75,1	0,8	24,1	4961,0
		Desv.Pad.	0,4	0,0	0,4	0,0
		CV	0,6%	5,9%	1,8%	0,0%
	250°C - 2,0 h	1	70,5	0,5	29,0	5281,5
		2	70,6	0,8	28,6	5217,0
		3	72,2	0,8	27,0	5101,5
		Média	71,1	0,7	28,2	5200,0
		Desv.Pad.	0,9	0,2	1,1	91,2
		CV	1,3%	30,7%	3,8%	1,8%
	280°C - 0,5 h	1	70,5	1,1	28,4	5046,5
		2	70,4	1,0	28,7	5178,0
		3	71,0	1,3	27,7	5071,0
		Média	70,6	1,1	28,3	5098,5
		Desv.Pad.	0,3	0,2	0,5	69,9
		CV	0,5%	14,3%	1,7%	1,4%
	280°C - 2,0 h	1	55,6	1,4	43,0	5693,5
		2	58,6	1,0	40,5	5696,5
		3	47,8	1,1	51,1	6105,0
		Média	54,0	1,1	44,9	5831,7
		Desv.Pad.	5,5	0,2	5,5	236,7
		CV	10,3%	21,8%	12,4%	4,1%

Anexo B - Resultados das análises químicas dos materiais nos diferentes tratamentos

(conclusão)

Material	Tratamento	Rep.	M.volat(%)	Cinzas(%)	C.fixo(%)	PCS (kcal/kg)
BAGAÇO	Original	1	81,8	5,7	12,4	4440,0
		2	81,7	5,8	12,4	4443,5
		3	81,9	5,8	12,3	4450,0
		Média	81,8	5,8	12,4	4444,5
		Desv.Pad.	0,1	0,1	0,1	5,1
		CV	0,1%	0,9%	0,6%	0,1%
	250°C - 0,5 h	1	73,8	6,4	19,8	4436,0
		2	75,0	6,1	18,9	4458,5
		3	72,1	8,5	19,5	4496,5
		Média	73,6	7,0	19,4	4463,7
		Desv.Pad.	1,5	1,3	0,5	30,6
		CV	2,0%	18,2%	2,4%	0,7%
	250°C - 2,0 h	1	71,9	8,6	19,6	4543,0
		2	71,6	6,9	21,4	4553,0
		3	72,0	7,7	20,3	4508,0
		Média	71,8	7,7	20,4	4534,7
		Desv.Pad.	0,2	0,8	0,9	23,6
		CV	0,3%	10,7%	4,6%	0,5%
	280°C - 0,5 h	1	66,2	11,4	22,5	4622,0
		2	68,9	7,3	23,8	4558,0
		3	64,5	9,6	25,9	4935,5
		Média	66,5	9,4	24,0	4705,2
		Desv.Pad.	2,2	2,1	1,7	202,0
		CV	3,3%	21,8%	7,1%	4,3%
	280°C - 2,0 h	1	58,8	10,3	30,9	4915,5
		2	57,5	14,0	28,5	4857,5
		3	60,0	11,1	28,9	4923,5
		Média	58,8	11,8	29,4	4898,8
		Desv.Pad.	1,3	1,9	1,3	36,0
		CV	2,1%	16,5%	4,3%	0,7%

Anexo C - Análise estatística (ANOVA) e teste de Tukey com 5% de significância para o teor de extrativos do bagaço de cana-de-açúcar nos diferentes tratamentos

Tratamento	1 B. Original	2 B. 250 - 0,5	3 B. 250 - 2	4 B. 280 - 0,5	5 B. 280 - 2	
	5,6	7,5	6,0	5,8	4,2	
	5,9	7,9	4,9	6,2	4,3	
	5,6	7,3	5,5	6,5	4,2	
Total	17,088	22,720	16,428	18,485	12,687	87,407
Média	5,696	7,573	5,476	6,162	4,229	5,827
Variância	0,02226	0,09650	0,27764	0,12433	0,00153	

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	F tab
Tratamentos	4	17,567	4,39177	42,04473	3,48
Resíduo	10	1,045	0,104455	-	-
Total	14	18,612	-	-	-

Teste de Tukey	q = 4,65
DMS	0,868

Tratamento	Média	Tukey		
B.250-0,5	7,6	a		
B.280-0,5	6,2		b	
B.Original	5,7		b	
B.250-2,0	5,5		b	
B.280-2,0	4,2			c

Anexo D - Análise estatística (ANOVA) e teste de Tukey com 5% de significância para o teor de extrativos do eucalipto nos diferentes tratamentos

Tratamento	1 E. Original	2 E. 250 - 0,5	3 E. 250 - 2	4 E. 280 - 0,5	5 E. 280 - 2	
	6,9	8,8	7,0	8,5	6,2	
	7,0	8,8	6,6	7,7	5,8	
	6,7	8,8	6,8	8,1	6,0	
Total	20,617	26,397	20,427	24,355	18,020	109,816
Média	6,872	8,799	6,809	8,118	6,007	7,321
Variância	0,01326	0,00000	0,03273	0,16908	0,04680	

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	F tab
Tratamentos	4	15,031	3,757812	71,74733	3,48
Resíduo	10	0,524	0,052376	-	-
Total	14	15,555	-	-	-

Teste de Tukey	q = 4,65
DMS	0,614

Tratamento	Média	Tukey		
E.250-0,5	8,8	a		
E.280-0,5	8,1		b	
E.Original	6,9		c	
E.250-2,0	6,8		c	
E.280-2,0	6,0			d

Anexo E - Análise estatística (ANOVA) e teste de Tukey com 5% de significância para o teor de lignina do bagaço de cana-de-açúcar nos diferentes tratamentos

Tratamento	1 B. Original	2 B. 250 - 0,5	3 B. 250 - 2	4 B. 280 - 0,5	5 B. 280 - 2	
	24,4	36,1	45,2	48,8	74,8	
	25,3	36,5	43,3	48,1	74,9	
	23,9	36,9	44,2	49,6	75,3	
Total	73,581	109,503	132,723	146,457	225,016	687,280
Média	24,527	36,501	44,241	48,819	75,005	45,819
Variância	0,52673	0,19401	0,93727	0,53027	0,05839	

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	F tab
Tratamentos	4	4210,560	1052,64	2342,667	3,48
Resíduo	10	4,493	0,449334	-	-
Total	14	4215,053	-	-	-

Teste de Tukey	q = 4,65
DMS	1,800

Tratamento	Média	Tukey				
B.280-2,0	75,0	a				
B.280-0,5	48,8		b			
B.250-2,0	44,2			c		
B.250-0,5	36,5				d	
B.Original	24,5					e

Anexo F - Análise estatística (ANOVA) e teste de Tukey com 5% de significância para o teor de lignina do eucalipto nos diferentes tratamentos

Tratamento	1	2	3	4	5	
	E. Original	E. 250 - 0,5	E. 250 - 2	E. 280 - 0,5	E. 280 - 2	
	25,8	38,5	47,6	45,9	72,3	
	26,7	39,2	45,9	46,5	72,2	
	27,1	39,2	46,4	45,6	72,2	
Total	79,549	116,948	139,876	137,954	216,702	691,028
Média	26,516	38,983	46,625	45,985	72,234	46,069
Variância	0,39918	0,16374	0,76021	0,22449	0,00347	

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	F tab
Tratamentos	4	3352,372	838,093	2701,61	3,48
Resíduo	10	3,102	0,31022	-	-
Total	14	3355,475	-	-	-

Teste de Tukey	q = 4,65
DMS	1,495

Tratamento	Média	Tukey			
E.280-2,0	72,2	a			
E.250-2,0	46,6		b		
E.280-0,5	46,0		b		
E.250-0,5	39,0			c	
E.Original	26,5				d

Anexo G - Análise estatística (ANOVA) e teste de Tukey com 5% de significância para o carbono fixo do bagaço de cana-de-açúcar nos diferentes tratamentos

Tratamento	1 B. Original	2 B. 250 - 0,5	3 B. 250 - 2	4 B. 280 - 0,5	5 B. 280 - 2	
	12,4	19,8	19,6	22,5	30,9	
	12,4	18,9	21,4	23,8	28,5	
	12,3	19,5	20,3	25,9	28,9	
Total	37,154	58,228	61,340	72,136	88,243	317,100
Média	12,385	19,409	20,447	24,045	29,414	21,140
Variância	0,00594	0,21537	0,88423	2,91691	1,61069	

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	F tab
Tratamentos	4	471,108	117,777	104,539	3,48
Resíduo	10	11,266	1,12663	-	-
Total	14	482,374	-	-	-

Teste de Tukey	q = 4,65
DMS	2,850

Tratamento	Média	Tukey			
B. 280-2,0	29,4	a			
B. 280-0,5	24,0		b		
B. 250-2,0	20,4			c	
B. 250-0,5	19,4			c	
B. Original	12,4				d

Anexo H - Análise estatística (ANOVA) e teste de Tukey com 5% de significância para o carbono fixo do eucalipto nos diferentes tratamentos

Tratamento	1	2	3	4	5	
	E. Original	E. 250 - 0,5	E. 250 - 2	E. 280 - 0,5	E. 280 - 2	
	18,0	24,6	29,0	28,4	43,0	
	17,7	23,8	28,6	28,7	40,5	
	17,0	24,0	27,0	27,7	51,1	
Total	52,668	72,426	84,629	84,852	134,568	429,143
Média	17,556	24,142	28,210	28,284	44,856	28,610
Variância	0,29545	0,19150	1,14329	0,23155	30,78081	

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	F tab
Tratamentos	4	1219,042	304,76	46,6814	3,48
Resíduo	10	65,285	6,52852	-	-
Total	14	1284,327	-	-	-

Teste de Tukey	q = 4,65
DMS	6,860

Tratamento	Média	Tukey		
E.280-2,0	44,9	a		
E.280-0,5	28,3		b	
E.250-2,0	28,2		b	
E.250-0,5	24,1		b	
E.Original	17,6			c

Anexo I - Análise estatística (ANOVA) e teste de Tukey com 5% de significância para os compostos voláteis do bagaço de cana-de-açúcar nos diferentes tratamentos

Tratamento	1	2	3	4	5	
	B. Original	B. 250 - 0,5	B. 250 - 2	B. 280 - 0,5	B. 280 - 2	
	81,8	73,8	71,9	66,2	58,8	
	81,7	75,0	71,6	68,9	57,5	
	81,9	72,1	72,0	64,5	60,0	
Total	245,466	220,777	215,497	199,592	176,322	1057,653
Média	81,822	73,592	71,832	66,531	58,774	70,510
Variância	0,00766	2,10989	0,03769	4,94042	1,57315	

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	F tab
Tratamentos	4	878,362	219,59	126,655	3,48
Resíduo	10	17,338	1,73376	-	-
Total	14	895,699	-	-	-

Teste de Tukey	q = 4,65
DMS	3,535

Tratamento	Média	Tukey			
B.Original	81,8	a			
B.250-0,5	73,6		b		
B.250-2,0	71,8		b		
B.280-0,5	66,5			c	
B.280-2,0	58,8				d

Anexo J - Análise estatística (ANOVA) e teste de Tukey com 5% de significância para os compostos voláteis do eucalipto nos diferentes tratamentos

Tratamento	1	2	3	4	5	
	E. Original	E. 250 - 0,5	E. 250 - 2	E. 280 - 0,5	E. 280 - 2	
	81,0	74,6	70,5	70,5	55,6	
	81,8	75,4	70,6	70,4	58,6	
	82,6	75,2	72,2	71,0	47,8	
Total	245,401	225,313	213,253	211,856	161,992	1057,815
Média	81,800	75,104	71,084	70,619	53,997	70,521
Variância	0,63426	0,17244	0,90047	0,10531	30,63385	

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	F tab
Tratamentos	4	1264,765	316,191	48,7253	3,48
Resíduo	10	64,893	6,48927	-	-
Total	14	1329,658	-	-	-

Teste de Tukey	q = 4,65
DMS	6,839

Tratamento	Média	Tukey		
E.Original	81,8	a		
E.250-0,5	75,1		ab	
E.250-2,0	71,1		b	
E.280-0,5	70,6		b	
E.280-2,0	54,0			c

Anexo K - Análise estatística (ANOVA) e teste de Tukey com 5% de significância para o teor de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar nos diferentes tratamentos

Tratamento	1 B. Original	2 B. 250 - 0,5	3 B. 250 - 2	4 B. 280 - 0,5	5 B. 280 - 2	
	5,7	6,4	8,6	11,4	10,3	
	5,8	6,1	6,9	7,3	14,0	
	5,8	8,5	7,7	9,6	11,1	
Total	17,379	20,996	23,163	28,272	35,436	125,246
Média	5,793	6,999	7,721	9,424	11,812	8,350
Variância	0,00292	1,62265	0,68092	4,22461	3,78505	

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	F tab
Tratamentos	4	65,694	16,4235	7,96007	3,48
Resíduo	10	20,632	2,06323	-	-
Total	14	86,326	-	-	-

Teste de Tukey	q = 4,65
DMS	3,856

Tratamento	Média	Tukey		
B.280-2,0	11,8	a		
B.280-0,5	9,4		ab	
B.250-2,0	7,7			b
B.250-0,5	7,0			b
B.Original	5,8			b

Anexo L - Análise estatística (ANOVA) e teste de Tukey com 5% de significância para o teor de cinzas do eucalipto nos diferentes tratamentos

Tratamento	1 E. Original	2 E. 250 - 0,5	3 E. 250 - 2	4 E. 280 - 0,5	5 E. 280 - 2	
	0,5	0,7	0,5	1,1	1,4	
	0,5	0,7	0,8	1,0	1,0	
	0,4	0,8	0,8	1,3	1,1	
Total	1,411	2,261	2,162	3,292	3,440	12,565
Média	0,470	0,754	0,721	1,097	1,147	0,838
Variância	0,00153	0,00200	0,03668	0,02475	0,06232	

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	F tab
Tratamentos	4	0,956	0,239005	9,388015	3,48
Resíduo	10	0,255	0,025459	-	-
Total	14	1,211	-	-	-

Teste de Tukey	q = 4,65
DMS	0,428

Tratamento	Média	Tukey				
E.280-2,0	1,1	c				
E.280-0,5	1,1		bc			
E.250-0,5	0,8			abc		
E.250-2,0	0,7				ab	
E.Original	0,5					a

Anexo M - Análise estatística (ANOVA) e teste de Tukey com 5% de significância para o poder calorífico do bagaço de cana-de-açúcar nos diferentes tratamentos

Tratamento	1	2	3	4	5	
	B. Original	B. 250 - 0,5	B. 250 - 2	B. 280 - 0,5	B. 280 - 2	
	4440	4436	4543	4622	4915,5	
	4443,5	4458,5	4553	4558	4857,5	
	4450	4496,5	4508	4935,5	4923,5	
Total	13333,500	13391,000	13604,000	14115,500	14696,500	69140,500
Média	4444,500	4463,667	4534,667	4705,167	4898,833	4609,367
Variância	25,75000	935,08333	558,33333	40814,08333	1297,33333	

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	F tab
Tratamentos	4	440874,567	110219	12,6309	3,48
Resíduo	10	87261,167	8726,12	-	-
Total	14	528135,733	-	-	-

Teste de Tukey	q = 4,65
DMS	250,786

Tratamento	Média	Tukey			
B.280-2,0	4898,8	a			
B.280-0,5	4705,2		ab		
B.250-2,0	4534,7			bc	
B.250-0,5	4463,7			bc	
B.Original	4444,5				c

Anexo N - Análise estatística (ANOVA) e teste de Tukey com 5% de significância para o poder calorífico do eucalipto nos diferentes tratamentos

Tratamento	1	2	3	4	5	
	E. Original	E. 250 - 0,5	E. 250 - 2	E. 280 - 0,5	E. 280 - 2	
	4563	4961	5281,5	5046,5	5693,5	
	4630	4961	5217	5178	5696,5	
	4723	4961	5101,5	5071	6105	
Total	13916,000	14883,000	15600,000	15295,500	17495,000	77189,500
Média	4638,667	4961,000	5200,000	5098,500	5831,667	5145,967
Variância	6456,33333	0,00000	8316,75000	4890,25000	56035,58333	

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	F tab
Tratamentos	4	2300769,400	575192	37,9921	3,48
Resíduo	10	151397,833	15139,8	-	-
Total	14	2452167,233	-	-	-

Teste de Tukey	q = 4,65
DMS	330,333

Tratamento	Média	Tukey		
E.280-2,0	5831,67	a		
E.250-2,0	5200,00		b	
E.280-0,5	5098,50		b	
E.250-0,5	4961,00			bc
E.Original	4638,67			c